¿QUÉ SABEMOS DE?

Por qué y cómo se hace la ciencia

Pere Puigdomènech

CSIC

CATARATA

CSIC

CATARATA

Por qué y cómo se hace la ciencia

Pere Puigdomènech

CSIC

CATARATA

Colección ¿Qué sabemos de?

COMITÉ EDITORIAL
Pilar Tigeras Sánchez, CSIC
Carmen Guerrero Martínez, CSIC
Pura Fernández Rodríguez, CSIC
Arantza Chivite Vázquez, Editorial Los Libros de la Catarata
Javier Senén García, Editorial Los Libros de la Catarata
Carmen Viamonte Tortajada, Cyan Proyectos Editoriales
Manuel de León Rodríguez, CSIC
Isabel Varela Nieto, CSIC
Alberto Casas González, CSIC
Rafael Huertas García-Alejo, CSIC

CONSEJO ASESOR
Carlos Andrés Prieto de Castro, CSIC
Dolores González Pacanowska, CSIC
Elena Castro Martínez, CSIC
Avelino Corma Canós, CSIC
Ginés Morata Pérez, CSIC
Pilar Goya Laza, CSIC
Rosina López-Alonso Fandiño, CSIC
María Victoria Moreno Arribas, CSIC
David Martín de Diego, CSIC
Miguel Ángel Puig-Samper, CSIC
Jaime Pérez del Val, CSIC
Elena García Armada, CSIC

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:
https://cpage.mpr.gob.es

Diseño gráfico de cubierta: Carlos Del Giudice

© Pere Puigdomènech, 2021
© CSIC, 2021
http://editorial.csic.es
publ@csic.es
© Los Libros de la Catarata, 2021
Fuencarral, 70
28004 Madrid
Tel. 91 532 20 77
www.catarata.org

ISBN (CSIC): 978-84-00-10777-2
ISBN ELECTRÓNICO (CSIC): 978-84-00-10778-9
ISBN (CATARATA): 978-84-1352-206-7
ISBN ELECTRÓNICO (CATARATA): 978-84-1352-207-4
NIPO: 833-21-028-7
NIPO ELECTRÓNICO: 833-21-029-2
DEPÓSITO LEGAL: M-8.081-2021
THEMA: PDZ/PDR

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Ni la totalidad ni parte de este libro, incluido el diseño de la cubierta, puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en manera alguna por medio ya sea electrónico, químico, óptico, informático, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo por escrito del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Los Libros de la Catarata. Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. El Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Los Libros de la Catarata, por su parte, solo se hacen responsables del interés científico de sus publicaciones.

El genio científico completo ha de reunir en sí tres personalidades harto desemejantes: la del minero infatigable y paciente que arranca la hulla de los filones profundos; la del químico práctico, que aprovecha ingeniosamente el material bruto para fabricar espléndidos colores que anilina, y, en fin, la del artista que, combinando diestramente estos colores, sabe pintar los episodios heroicos de la lucha entablada entre el espíritu y la materia, el alcance teórico de los resultados y, en fin, sus ventajas en pro del aumento y comodidad de la vida.

Santiago Ramón y Cajal, *Charlas de café*, 1920

Índice

INTRODUCCIÓN 9

CAPÍTULO 1. La aventura de la ciencia 11

CAPÍTULO 2. Las funciones de la ciencia 26

CAPÍTULO 3. Dónde y quién hace la investigación científica 35

CAPÍTULO 4. Cómo se investiga y cómo se publica 52

CAPÍTULO 5. Quién financia la ciencia 67

CAPÍTULO 6. La ciencia se desarrolla siguiendo un conjunto complejo de normas 79

CAPÍTULO 7. La consulta a la ciencia 89

CAPÍTULO 8. La comunicación de la ciencia en un mundo digital 101

CAPÍTULO 9. Ciencia y ética 111

CONCLUSIÓN. Una ambición sin fronteras
en un marco riguroso 127

LECTURAS RECOMENDADAS 131

Introducción

Que en una colección de libros que se ha estado ocupando durante más de 11 años de servir al lector o lectora, presentando de forma breve y asequible ideas de la ciencia en sus diferentes facetas, se proponga publicar un texto sobre la ciencia ella misma parece razonable. Puede no serlo tanto escribirlo. La ciencia es una actividad compleja y muy diversa que emplea a millones de personas en el mundo y que tiene un impacto en la manera como pensamos, en la manera como toman decisiones los gobiernos y en la manera como vivimos. Por tanto, describirla en poco más de 100 páginas parece como mínimo un reto difícil, pero por ello mismo puede valer la pena intentarlo.

El texto que sigue trata de responder a preguntas sobre por qué la sociedad dedica esfuerzos en investigación científica, cómo se investiga, quién lo hace y dónde se hace. Trata de describir la evolución de la ciencia en la historia, las funciones múltiples que cumple en nuestras sociedades y cuál es su funcionamiento interno. La ciencia actual es un mundo complejo, con normas estrictas que son las que le dan su credibilidad ante la sociedad. Sin embargo, también la ciencia está sufriendo una gran trasformación por efecto de su misma influencia en la sociedad actual, por efecto de la globalización y de la digitalización de sus actividades. Todo ello no deja de plantear

conflictos y de desvelar debilidades, que son las inherentes a toda obra humana.

A lo largo del libro se presentan temáticas que son objeto de debates complejos entre especialistas. A veces en una frase se tiene que hacer un imposible resumen de cuestiones que son objeto de artículos de revistas y de libros enteros. Si alguna de estas consideraciones despierta la curiosidad del lector y le anima a estudiar en profundidad estos temas y participar en su debate, el libro habría cumplido con su objetivo. El punto de vista desde el cual está escrito es el de un profesional de la ciencia que ha dedicado toda su vida a ella. Hay desde luego otros puntos de vista posibles. Sin embargo, esta perspectiva tiene la ventaja de poder trasladar al lector una visión desde dentro de la actividad científica. Es el punto de vista de alguien que está convencido de que la investigación científica es una de las actividades más apasionantes a las que un individuo puede dedicar su vida profesional. Y que también está convencido de que una ciencia rigurosa y viva es un requisito esencial de las sociedades democráticas en el mundo abierto y global en el que vivimos y en las que la reflexión científica es imprescindible para afrontar los retos que tienen ante sí.

CAPÍTULO 1

La aventura de la ciencia

Los orígenes del pensamiento científico

Decir que la ciencia nació, como la democracia, en Grecia, es simplificar mucho la cuestión, aunque la afirmación contiene grados importantes de verosimilitud. Los humanos que hace unos 100.000 años salieron de África para poblar el planeta debieron de plantearse en su vida cotidiana cuestiones que no son tan diferentes a las que nos planteamos nosotros. Necesitaban encontrar comida y agua cada día; necesitaban defenderse de los ataques de animales, incluyendo otros grupos similares a los suyos; deseaban comprender lo que había que hacer cuando alguien enfermaba o tenía un accidente y necesitaba que sus grupos sociales se organizaran de forma armoniosa y pudieran permitir la formación de parejas y el cuidado de los hijos que salieran de ellas, entre muchas otras cuestiones. Todo ello lo hacían apoyándose en las ventajas que les proporcionan las características propias de los humanos que proceden de su desarrollo cerebral y su desarrollo social, y que les han permitido poblar progresivamente todos los rincones del planeta.

La inteligencia para analizar la realidad y hacer predicciones, la capacidad de organizarse socialmente, en particular gracias al lenguaje, y la posibilidad de construir herramientas y de alimentarse de fuentes muy diversas son algunas de las

características de los humanos que les permitieron adaptarse y desarrollar con éxito su vida en entornos muy diversos. Ello implica, por ejemplo, una capacidad para interesarse por lo que es desconocido y por tratar de sobrevivir en entornos nuevos con su clima particular y con plantas o animales distintos que comer o de los que defenderse. La curiosidad ha sido desde siempre una característica esencial de la especie humana que le lleva a preguntarse por las razones que hay detrás de los fenómenos que observamos.

En la gran mayoría de las sociedades de las que tenemos noticias históricas hemos encontrado vestigios de que sus miembros estaban interesados por los movimientos de los astros. Los podemos imaginar observando el cielo en las noches estrelladas, que podemos suponer que eran entonces diáfanas, y preguntándose por la razón de la inmensidad de las estrellas, por los movimientos del Sol, la Luna y los planetas, y por fenómenos que parecían llevar algún mensaje en ellos, como los eclipses o los meteoritos. Habían observado también que estos movimientos estaban relacionados con las estaciones del año, lo que era importante para saber cuándo se producían las migraciones de los animales o la floración de las plantas, así como la producción de los granos y frutos de los que se alimentaban. Del cielo recibían mensajes que se esforzaban por desentrañar y por ello en todas las civilizaciones se han construido observatorios y calendarios que pueden ser muy precisos y complejos. La búsqueda de explicaciones sobre el mundo en el que vivían dio lugar a mitos que se transmitían de forma oral gracias a los lenguajes articulados que habían desarrollado. Nos han dejado muestras de la complejidad de sus creencias en manifestaciones de arte como las pinturas o esculturas que realizaban. Por tanto, observación de los fenómenos materiales y formulación y transmisión de explicaciones teóricas probablemente se dieron de una forma u otra en todos los momentos de la evolución de las sociedades formadas por *Homo sapiens*.

En cuanto las sociedades se hicieron complejas, sus miembros desarrollaron sistemas para almacenar y transmitir

la información en forma de lenguaje escrito, lo que posibilita que se acumule el conocimiento de que disponía el colectivo que a menudo incluye mitos fundacionales de la sociedad y del mundo. Aparecen las creencias religiosas que se convierten en sistemas de pensamiento articulados y que sirven a la vez para responder a grandes cuestiones sobre el universo y para cohesionar las sociedades que se iban haciendo cada vez más complejas. Tenemos también constancia de que para llevar a cabo las transacciones comerciales que se habían vuelto necesarias en las sociedades en que había oficios especializados había que medir y contar. En todas las sociedades neolíticas complejas, hace seis o siete milenios, aparecieron sistemas de escritura con signos matemáticos para realizar operaciones de dificultad creciente.

Es cierto, sin embargo, que si hemos de buscar textos que describan elaboraciones intelectuales que podamos identificar como textos originales de la ciencia, debemos remitirnos a la Grecia clásica. La cultura griega la podemos comenzar a datar a partir de Homero y sus grandes epopeyas, cuyo incierto nacimiento podría darse hacia el año 800 antes de nuestra era. Entre este momento y la gran época dorada de la Atenas, hacia el año 500 a. C., existieron un conjunto de pensadores muchos de ellos en la costa griega de la actual Turquía de los que sabemos que formularon teorías sobre los fenómenos de la materia como Tales de Mileto, que propusieron reglas matemáticas como Pitágoras o soluciones para cuando se presentan enfermedades como Hipócrates. Justo antes de la gran época clásica hubo filósofos que propusieron teorías que nos suenan tan actuales como la evolución de los animales y la especie humana de Anaximandro o la teoría atómica de Demócrito.

Pero es sobre todo a los grandes filósofos clásicos griegos como Sócrates, Platón y muy en particular Aristóteles a quienes debemos la formulación de teorías sistemáticas de lo que se llamaría la filosofía natural que nos acompañaría hasta más allá del Renacimiento. Baste recordar que entre sus libros se encuentran los dedicados a la lógica, la física o la biología que quizá fue él el primero en nombrar así. Por tanto, hay una

parte de exactitud en atribuir a la Grecia clásica el nacimiento de la ciencia. La fecundidad de este periodo es extraordinaria no solo en ciencia sino en filosofía, incluyendo la ética y desde luego en política, ya que se desarrolla en este tiempo lo que, con sus limitaciones, será el primer sistema democrático que conocemos. Tras esta época especialmente creativa encontramos también nombres relevantes que prolongan el esfuerzo del pensamiento humano a través de los periodos helenístico y romano. Baste recordar el de Arquímedes, que traslada el conocimiento de la mecánica al desarrollo de máquinas de uso diverso; el de Euclides, fundador de la geometría; el de Eratóstenes, el primero en proponer y medir la redondez de la Tierra, o el de Galeno, cuyo nombre estará ligado a la práctica de la medicina para siempre. En tiempos romanos podemos mencionar una obra como *De rerum natura*, en la que Lucrecio realiza una síntesis del enfoque de lo que era la filosofía natural desde la visión del epicureísmo, una de las escuelas que aparecieron con posterioridad a la filosofía clásica.

La ciencia moderna

Para que la aventura de la ciencia continúe su camino, como para muchos otros aspectos de la cultura, de la época romana debemos saltar hasta el Renacimiento para seguir el rastro del camino que nos lleva a la ciencia moderna. En el periodo intermedio hay contribuciones de los filósofos medievales, de la ciencia y la medicina árabe o de la matemática india, entre otras, pero es en la Europa renacentista donde encontramos otra época fecunda en ideas para la ciencia. En esta época no se produce simplemente una recuperación de las ideas de la época griega y helenística que en parte llega a Europa con la caída de Constantinopla en 1453. La llegada de Vasco de Gama a la India en 1498 y la de Cristóbal Colón a las Indias Occidentales en 1492 abren nuevas perspectivas al mundo renacentista. Junto con la expansión de la imprenta, es todo un nuevo mundo que se abre en este periodo y que tiene un

momento clave en la publicación en 1543 de *De revolutionibus orbium coelestium* de Nicolás Copérnico, libro en el que se propone una estructura del sistema solar centrada en el Sol y no en la Tierra, como proclamaba la tradición adoptada por la Iglesia católica dominante en la época.

La ciencia que se desarrolla a partir del Renacimiento representa una nueva visión sobre la manera como observamos y analizamos los fenómenos naturales. Baste tener en cuenta dos gestos que podemos considerar fundacionales de la ciencia moderna. Uno de ellos es la disección de cadáveres humanos por parte de Andreas Vesalius a mediados del siglo XVI, lo que dio lugar a una importante controversia en su tiempo. Sin embargo, su libro de anatomía acabó siendo un punto de referencia clave para la medicina moderna. El otro gesto, unos decenios después, fue el de Galileo Galilei cuando decidió dirigir un telescopio hacia el cielo. Los telescopios se habían construido poco tiempo antes principalmente para la observación terrestre con objetivos a menudo militares. Pero Galileo lo dirige hacia el cielo y ahí descubre detalles como los satélites de Júpiter que parecen ser un modelo reducido del sistema solar que había sido propuesto por Copérnico. La visión de Galileo incluye otra afirmación clave para el desarrollo de la ciencia moderna al proclamar que los fenómenos de la naturaleza tienen que medirse y analizarse con lenguaje matemático: "Las matemáticas son el lenguaje en el que Dios ha escrito el Universo". La observación de los fenómenos en la forma más apropiada y la descripción matemática de los mismos son dos características esenciales de la ciencia que construye sus fundamentos en el Renacimiento.

Otro de los hitos esenciales en la construcción de la ciencia en el siglo XVII es considerar la mecánica como parte del núcleo central de la física, algo que hizo Isaac Newton en su libro *Philosophiae naturalis principia mathematica* de 1687, una de las obras más influyentes de la ciencia moderna. En él, Newton utiliza un lenguaje matemático que él mismo construye para describir y explicar en términos de fuerzas los fenómenos del movimiento de los astros y de la caída de los

objetos sobre la superficie de la Tierra. Newton, junto con un conjunto de contemporáneos, inaugura un gran periodo en el que la física se desarrolla y demuestra su poder de descripción y predicción de un gran número de fenómenos naturales. Un dato interesante de Newton es que presidió durante años la Royal Society de Londres, una de las primeras academias científicas europeas. Estas sociedades se desarrollaron en la mayoría de los países europeos y se convirtieron en los foros que permitían la presentación y discusión de los descubrimientos científicos. En el entorno de sociedades y reuniones filosóficas y científicas se desarrolla en movimiento de la Ilustración especialmente en Francia y Alemania, donde las ideas de la ciencia se entrelazan con la formulación de las concepciones sociales que darán paso a las transformaciones políticas cuyo ejemplo más notorio son las que dan lugar a la Revolución francesa. En este entorno destacan figuras como las de los autores de la *Enciclopedia*, en la que se debería contener el conjunto completo de los saberes científicos y de las ideas ilustradas o las de exploradores de lo que eran nuevos mundos para los europeos como el alemán Alexander von Humboldt. Sin embargo, en esta época el cultivo de la ciencia y el de la filosofía toman a menudo caminos separados, sobre todo con el uso privilegiado de lenguaje matemático en los trabajos científicos y la tendencia de mucha de la filosofía de su época a convertirse en metafísica.

Es una constante en la historia que los periodos de mayor avance científico se corresponden con los de la aparición de nuevas tecnologías y de formas más avanzadas de organización social. Y así ocurre en la Ilustración, que a menudo se denomina también el Siglo de las Luces. Durante este periodo que podemos datar entre el siglo XVII y hasta la Revolución francesa (siglo XVIII), junto a la formulación de nuevas ideas científicas y políticas, fueron apareciendo, por ejemplo, nuevas maneras de labrar la tierra o de obtener y trabajar los metales. Sin embargo, el cambio tecnológico de mayor impacto fue a finales del siglo XVIII provocado por la aparición de la máquina de vapor. Esta proporcionaba una fuerza capaz de mover fábricas

y trenes sin el esfuerzo humano o de animales y sin depender de la cercanía a un río o de la fuerza del viento, como ocurría con los molinos del pasado. Sus efectos en la industria y el transporte, la denominada Revolución industrial, fueron inmediatos y sus impactos en la vida de las naciones, sobre todo las europeas, fueron de una envergadura enorme.

En los dos siglos posteriores a Newton la práctica de la ciencia se afianza en diferentes direcciones. La física se complementa con múltiples descubrimientos como el del electromagnetismo, que culmina con la formulación de las leyes de Maxwell, que propone una descripción completa de estas fuerzas. El estudio de la corriente eléctrica lleva a su aplicación generalizada como forma de distribuir energía de forma eficiente. Al mismo tiempo se van definiendo los componentes elementales de la materia y sus reacciones como el principio de la combustión por la acción del oxígeno propuesta por Antoine Lavoisier y que dan nacimiento a la química. A finales del XIX la tabla periódica de los elementos de Dimitri Mendeleev ordena los elementos de que está compuesta la materia y comienzan a aparecer lo que serán las grandes empresas químicas. A principios de siglo Friedrich Wöhler había sintetizado la urea a partir de substancias inorgánicas, lo que enterraba la idea de que la materia viva estaba compuesta de substancias distintas. De esta forma, durante todo el siglo se formulan los principios que fundamentan la biología. El sueco Carl Linneo ya había puesto una de las ideas clave en el siglo XVIII con su clasificación de las especies, pero es en el XIX cuando se formulan ideas básicas como las leyes de la genética de Mendel o las de la teoría celular de los seres vivos. A finales de siglo, Charles Darwin formula la teoría de la evolución de las especies por selección natural.

En medicina, el descubrimiento del origen infeccioso de muchas enfermedades por Louis Pasteur es también decisivo para la comprensión y el tratamiento de gran importancia en la vida de la gente. También en este caso el descubrimiento de los microorganismos fue el resultado de dirigir, ya en el siglo XVII, la observación mediante un telescopio no hacia la tierra

o el cielo, sino hacia una gota de agua sucia. En ella el holandés Antoni van Leeuwenhoek descubrió el nuevo mundo de las bacterias y los hongos microscópicos que Pasteur relacionó con las fermentaciones y con algunas enfermedades. Dos consecuencias del desarrollo de las ideas de la microbiología fueron decisivas para el aumento en la esperanza de vida de la gente en los años siguientes. Una de ellas es que permitió entender la razón de las medidas de higiene que utilizamos y dio lugar su extensión a otros usos; la otra es el desarrollo de vacunas contra enfermedades gracias a las cuales se consiguieron erradicar algunas de las más mortíferas.

De esta forma, el siglo XIX terminó con una explosión de nuevos conocimiento que hizo pensar a algunos que el conocimiento científico había llegado a su límite. Se atribuye al físico Albert Michelson, premio Nobel de Física de 1907, la afirmación en 1894 de que las grandes ideas de la física ya habían sido descubiertas y que solo quedaba por descubrir con mayor precisión los valores de sus constantes básicas. Curiosamente, uno de sus experimentos fue el origen que llevó a Albert Einstein a formular la teoría de la relatividad. Pero es posible que esta afirmación refleje el estado de pensamiento de las sociedades occidentales en aquel momento.

La ciencia había llegado a unos niveles de conocimiento muy elevados y la sociedad estaba cambiando de forma acelerada por la aplicación sistemática de nuevas tecnologías. Se habían ya construido las primeras plantas de producción de gas y de energía eléctrica durante la segunda mitad del siglo XIX. La industria química estaba produciendo colorantes y fármacos; por ejemplo, la aspirina aparece en 1899, anunciando lo que serían los primeros años del siglo XX, y se extendía el uso de la anestesia permitiendo que la cirugía ampliara sus aplicaciones. Para algunos no se podía hacer otra cosa que extender las aplicaciones de la ciencia del siglo XIX que había permitido una amplitud enorme en el conocimiento del mundo material. Sin embargo, el cambio en el pensamiento científico que se preparaba fue de una magnitud muy superior.

La ciencia del siglo XX

Las primeras décadas del siglo XX se encuentran entre las más fecundas en ideas científicas de la historia. Entre principios del siglo XX y el inicio de la Segunda Guerra Mundial se produce una explosión de nuevas ideas y teorías sobre todo en física. El desarrollo de métodos de observación crecientemente sensibles y precisos permitió realizar nuevos experimentos sobre las propiedades de la materia y de las fuerzas que se ejercen entre sus componentes. En ellos se descubren propiedades que no pueden explicarse siguiendo las teorías de la física aceptadas hasta aquel momento. La interpretación de la forma en que se emitía radiación por un cuerpo negro llevó a Max Planck a la conclusión de que esta no se hacía de forma continua, sino de forma proporcional a una constante que desde entonces lleva a su nombre. Esta proposición es incompatible con la física conocida hasta aquel momento y a medida que se fueron realizando experimentos sobre las propiedades de la materia en sus niveles más profundos se fue haciendo evidente la necesidad de reformular las bases de las teorías que describen la forma en que interaccionan los componentes básicos de la materia. Ello dio lugar a un conjunto de teorías que finalmente constituyeron lo que hoy conocemos como mecánica cuántica. Una consecuencia de estos experimentos, y del hallazgo de la radiactividad y de sus propiedades, fue el descubrimiento de que los átomos que forman la materia están formados por partículas de masa elevada dispuestas en un núcleo y por otras más ligeras, los electrones, dispuestos en órbitas que se definen también por sus propiedades cuánticas. La estructura de la materia a su nivel atómico solo puede entenderse utilizando teorías cuánticas.

Por otra parte, experimentos dirigidos a medir la velocidad de la luz respecto a un marco inmóvil que se denominaba el éter llevaron a concluir que esta velocidad no puede superarse. La consecuencia es que había que reformular también los conceptos básicos de la mecánica teniendo en cuenta este fenómeno. Ello llevó a Albert Einstein a la formulación de la teoría

de la relatividad y posteriormente a la teoría generalizada de la relatividad. Ambas son aplicables sobre todo a la física de los astros, pero llevaba consigo un corolario que implicaba la equivalencia entre masa y energía. Esto que podía parecer una disquisición teórica acabaría teniendo grandes consecuencias tanto para la física como para la sociedad humana en su conjunto con el desarrollo de la energía nuclear. Relatividad y mecánica cuántica proporcionaron la base teórica para la aparición de una nueva ciencia, la astrofísica, que estudia los fenómenos que ocurren en estrellas galaxias y en el universo en su conjunto. De forma progresiva se fueron abriendo nuevas ventanas para la observación del universo como los radiotelescopios que han ido permitiendo formular teorías contrastadas con los experimentos y que nos dan una visión global del universo. Disponemos desde aquel momento de teorías que permiten explicar lo que ocurre en los grandes cuerpos del universo y que proceden en algunos casos del estudio de los componentes más diminutos de la materia, las partículas elementales. Se trata, evidentemente, de construcciones teóricas que necesitan utilizar un aparato matemático de gran complejidad.

Durante las primeras décadas del siglo XX se formularon las nuevas teorías de la física y sus consecuencias aparecieron en muchos otros dominios de la ciencia. Por ejemplo, el uso de rayos x en el estudio de la materia permitió descubrir cómo los átomos se distribuyen en el espacio en las estructuras sólidas de la materia y ello fue esencial para comprender las propiedades de la química como lo será posteriormente para la biología. El fuerte aparato matemático que estas teorías requieren impulsó la profundización en las bases de la matemática y su relación con la lógica apareciendo disciplinas que solapan con la filosofía. Durante este tiempo se forma una corriente filosófica, la filosofía analítica, fuertemente influenciada por la lógica, que trata en particular de investigar las bases del lenguaje científico y filosófico. La filosofía de la ciencia, que se ocupa de entender los conceptos que fundamentan el conocimiento científico, se ha convertido en una de las principales disciplinas de la filosofía.

Posiblemente mayores consecuencias para la sociedad procedieron de las aplicaciones que aparecieron a partir de las nuevas ideas de la física. Por una parte la equivalencia entre materia y energía aplicada a lo que se iba descubriendo de la dinámica del núcleo atómico permitió proponer que en las reacciones nucleares podría existir una fuente de energía de gran magnitud. Que la demostración de este hecho fuera la explosión de las bombas atómicas que marcaron el final de la Segunda Guerra Mundial dejó una impronta decisiva en la física del siglo XX. Sin embargo, hay otros efectos de la física de principios del siglo XX que han cambiado el mundo y un buen ejemplo es el uso de los semiconductores. La comprensión de las propiedades de los materiales semiconductores es una consecuencia de la aplicación de la mecánica cuántica al estudio de cómo la electricidad se conduce al atravesar uniones entre diferentes materiales. Y estas propiedades permiten fabricar los dispositivos con los que se construyen los circuitos electrónicos. Su uso llevó a que aparecieran las radios con transistores, pero después han ido surgiendo circuitos integrados, chips, microchips y todo un conjunto de componentes que constituyen la base de los ordenadores, tabletas o teléfonos móviles, que se han convertido en una parte casi insustituible de nuestras vidas.

La formación de la ciencia actual

Si la primera mitad del siglo XX es la gran época de la física, la segunda mitad ha sido la gran época de la biología. Es cierto que tras la Segunda Guerra Mundial se pusieron en marcha algunos de los mayores instrumentos de experimentación científica jamás construidos como los aceleradores de partículas, gracias a los cuales se ha podido investigar el interior del núcleo atómico, las partículas que lo forman y las interacciones entre estas. Sin embargo, la profundidad a la que se ha llegado en el conocimiento de la biología en la segunda mitad del siglo es incomparable con el conocimiento anterior. El punto de partida de este periodo suele datarse en 1953 con la

publicación de la estructura en doble hélice del ADN que pocos años antes se había demostrado como la molécula que contiene la información genética que se transmite de padres a hijos. Una de las consecuencias de la nueva estructura era que permite proponer hipótesis sobre cómo esta información se copia y se transmite de una generación a otra. Con ello se confirmaba que a partir de datos moleculares se pueden explicar fenómenos básicos de la biología que es el postulado en el que se basa la biología molecular. En las décadas anteriores, la genética había ido desarrollándose y demostrando la fecundidad de sus conceptos sobre todo en animales modelo como la mosca *Drosophila*, pero también en las plantas cultivadas y los animales de granja. Este fue un factor decisivo para que, en la segunda mitad del siglo, la producción de alimentos pudiera responder a las necesidades globales de alimentación en un mundo con un crecimiento sostenido de la población humana. La investigación sobre el ADN tendrá una gran incidencia en todos los aspectos de la genética.

A partir de los años cincuenta se van sucediendo observaciones sobre los mecanismos que explican el funcionamiento de las células que constituyen todos los organismos vivos. Un buen ejemplo de ello es el descubrimiento del código genético que permite traducir la información escrita en el lenguaje del ADN en el que se necesita para la síntesis de las proteínas. A partir de los setenta, las técnicas del ADN recombinante permiten un conocimiento detallado de la información genética en un proceso exponencial que llevará a la resolución de genomas enteros de múltiples especies incluyendo la humana en el año 2001. Los métodos basados en el ADN se multiplican y se han convertido en la herramienta indispensable en campos tan alejados como la microbiología, la arqueología o en la investigación policiaca. Se desarrollaron también técnicas de modificación genética de muchas especies que se han convertido en una fuente de producción de fármacos y de nuevas variedades de plantas que llegaron al campo a mediados de la década de los noventa. Desde 2001 se han ido publicando las secuencias de genomas completos,

entre ellos el de individuos de la especie humana, lo que está abriendo una nueva ventana de conocimientos que constituye la genómica y sus aplicaciones.

Mientras la ciencia sigue su propia dinámica, tras la Segunda Guerra Mundial el mundo experimenta cambios de gran envergadura. Muchas naciones se dan cuenta de la devastación producida por la guerra y de las posibilidades destructoras que abren los nuevos armamentos. Por ello durante unos años se produce el movimiento para el establecimiento de reglas y gobiernos a nivel planetario como son la Declaración Universal de los Derechos Humanos (1948) y la creación de la Organización de las Naciones Unidas (1945) y sus estructuras específicas. Entre ellas algunas están relacionadas con la práctica científica como la Organización de las Naciones Unidas para la Ciencia la Educación y la Cultura (Unesco), la Organización Mundial de la Salud (OMS) o la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), que han supuesto un impacto global destacado aunque su actividad ha estado siendo restringida por motivos políticos a finales de siglo. También hay movimientos para cooperar en algunas disciplinas científicas sobre todo en Europa con la fundación del Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN) o la Organización Europea de Biología Molecular (EMBO) y se crean redes de sociedades científicas en la mayoría de ellas. Pero el crecimiento continuado de la población humana y de sus niveles de actividad en el mundo ha dado lugar a cambios tan significativos a nivel planetario que han llevado a que se proponga 1950 como el inicio de una nueva era geológica: el Antropoceno.

En el año 1950 la población humana era de unos 2.500 millones de habitantes, con una esperanza de vida que ya superaba los 70 años en algunos países (a principios de siglo era de entre 30 y 40 años y esa esperanza de vida todavía se mantenía en muchos lugares). Los avances de la medicina como los antibióticos, la extensión de la higiene y otras acciones preventivas como las vacunas, junto al acceso a la alimentación que ha ido creciendo durante el siglo y a la desaparición

de grandes guerras explican este hecho. En el año 2020 la población humana ha sobrepasado los 7.000 millones y la esperanza de vida ha seguido creciendo hasta que en muchos países ha superado los 80 años y la media que en 1950 estaba en 47 años ha llegado a más de 70 años en el mundo. Estos datos, junto con un consumo creciente de todo tipo de objetos materiales, algunos de los cuales no existían en 1950, como televisores, teléfonos móviles, ordenadores o los electrodomésticos, sin hablar de medios de transporte como automóviles o aviones cuyo uso de disparó durante este tiempo, demuestran el cambio del tipo de vida que se produjo en la población humana, pero también el impacto que implica sobre los recursos del planeta. La investigación científica fue siguiendo con detalle todos estos cambios planteando análisis globales entre los cuales se dio el nacimiento de disciplinas como la ecología para el estudio de los sistemas naturales complejos o como la sociología para el estudio de las sociedades humanas.

En el inicio del siglo XXI el papel de la ciencia en las sociedad humana es más determinante que nunca. Nuevos resultados siguen aportando información sobre las cuestiones que los humanos nos hemos planteado siempre. Por ejemplo, vamos teniendo datos cada vez más precisos sobre el origen y la evolución de la especie humana o sobre la existencia de planetas en sistemas estelares lejanos. El estudio del sistema nervioso y en particular del cerebro está permitiendo adentrarse en la comprensión de fenómenos como la memoria y su base celular. Las técnicas de análisis de imagen permiten estudiar cómo el cerebro recibe las sensaciones, las elabora y toma decisiones. Las neurociencias nos hacen volver a pensar conceptos tan fundamentales como la naturaleza de la conciencia o el libre albedrío. Algunos resultados de la biología tienen efectos sobre la comprensión de patologías como las que tienen una base genética incluyendo los tumores y se aplican de forma rápida en medicina. Las matemáticas pasan por un momento de florecimiento muy particular gracias a su uso en sistemas de cálculo y de tratamiento de datos que se están generando de forma masiva.

Muy en particular la ciencia está investigando les efectos de la actividad humana sobre los equilibrios globales de nuestro planeta. También desde la segunda mitad del siglo XX fue creciendo la conciencia de que el aumento de población y de las actividades de las sociedades modernas que necesitan un gran uso de recursos y dan lugar a residuos de todo tipo tienen un impacto creciente sobre los grandes parámetros del medioambiente. Se trata, por ejemplo, de la concentración de los gases de la atmósfera que provocan cambios en la temperatura media del aire, pero también en la composición de los océanos. Observamos también que las especies salvajes de nuestro entorno sufren una disminución en sus poblaciones o su extinción. Si se necesitaba alguna confirmación completa de los efectos de la globalización, la pandemia de la COVID-19 en el año 2020 nos advierte de los efectos y consecuencias de la evolución de nuestras sociedades. En este entorno, los datos y las conclusiones de la ciencia han demostrado ser más importantes y urgentes que nunca.

La aventura de la ciencia no es más que un reflejo de la aventura de la especie humana sobre la superficie del planeta Tierra.

CAPÍTULO 2

Las funciones de la ciencia

Las definiciones de la investigación científica

Hemos estado hablando de ciencia, pero no es fácil encontrar una definición que encuentre un consenso completo. De hecho, se han dado diversas definiciones para esta y el conjunto de las disciplinas que comprende y depende de la lengua en la que se defina. En inglés, "ciencia" (*science*) suele aplicarse solo a las ciencias naturales, mientras que en alemán "ciencia" (*Wissenschaft*) se aplica a todas las áreas del conocimiento y en el *Diccionario de la Lengua Española*, más ecléctico, encontramos las dos acepciones. Hay estudios que tratan de analizar la investigación científica desde diferentes puntos de vista, por ejemplo para tratar de analizar cómo y cuánto se invierte en ciencia y qué efectos tiene sobre la economía de las naciones. Se han desarrollado metodologías analíticas que intentan proporcionar respuestas a estas preguntas. Una de las más conocidas ha sido la que desarrolla la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) a través del llamado *Manual de Frascati*[1]. Para llevar a cabo su tarea, el manual necesita definir qué es la investigación científica.

1. En https://www.oecd.org/publications/manual-de-frascati-2015-978926 4310 681-es.htm

Comienza por proponer lo que se entiende por investigación y desarrollo: "La I+D (investigación y desarrollo experimental) comprende el trabajo creativo y sistemático realizado con el objetivo de aumentar el volumen de conocimiento (incluyendo el conocimiento de la humanidad, la cultura y la sociedad) y concebir nuevas aplicaciones a partir del conocimiento disponible".

El *Manual de Frascati* se denomina así porque en la localidad de Frascati, cercana a Roma y famosa por su vino, se reunió en el año 1963 un grupo de expertos en ciencia y tecnología de los países de la OCDE con el objetivo de armonizar la forma en que se gestiona y mide la investigación científica. El manual ha sido revisado en varias ocasiones y sigue siendo una referencia internacional. Por esta razón, la definición que hace de investigación y desarrollo puede ser un punto de partida para definir a quien trabaja en esta actividad. En ella se incluye la investigación en ciencias naturales y sociales, así como la investigación que va dirigida a encontrar aplicaciones de les descubrimientos que se realicen. Todo ello es indicativo de la gran complejidad que requiere el análisis de la investigación científica.

En el *Manual de Frascati* se hace también una distinción entre diferentes tipos de investigación que se utilizan habitualmente en los estudios sobre la investigación científica. Se trata de investigación básica, investigación orientada y desarrollo experimental. Según las definiciones adoptadas en este documento, la investigación básica sería aquella que se realiza "sin intención de otorgarles ninguna aplicación o utilización determinada". La aplicada, por su parte, "está dirigida fundamentalmente a un objetivo o propósito específico práctico". El desarrollo experimental consiste en trabajos que "se orientan a la fabricación de nuevos productos o procesos o a mejorar productos o procesos que ya existen". Estas definiciones se utilizan ampliamente y excluyen otros procesos de búsqueda de innovaciones como pueden ser el escalado de la producción, las actividades de diseño o de creación artística, por ejemplo. Estos diferentes tipos de investigación se integran en las reflexiones sobre la ciencia y se basan en diferencias

metodológicas, en las tradiciones de cada disciplina y en las motivaciones que predominan en cada una de ellas. Por tanto, podemos hablar de la unidad de la ciencia, pero también de una gran diversidad en su práctica.

Las disciplinas de la ciencia

Desde un punto de vista teórico es posible argumentar que el conjunto de los saberes científicos de las ciencias naturales pueden de alguna manera reducirse a las teorías de la física fundamental. Todo lo que sabemos actualmente nos obliga a concluir que la materia está hecha de moléculas, átomos y partículas, y que un reducido número de interacciones entre estos componentes nos explican las propiedades de la materia animada o inanimada. Sin embargo, la reducción de muchos fenómenos observables a lo más pequeño y fundamental puede ser muy compleja y difícil de conseguir, y probablemente inútil de intentarlo.

Un buen ejemplo de ello lo encontramos en la química. Esta está basada en el estudio de las interacciones que ejercen los átomos entre sí formando estructuras muy diversas. Si queremos entender estas interacciones y estas estructuras en sus niveles más profundos debemos recurrir a la mecánica cuántica y efectivamente existe una disciplina que se denomina química cuántica. Sin embargo, cuando nos interesamos por estructuras más complejas debemos basar la investigación en química en reglas propias de la disciplina. Algo similar podemos pensar de la microelectrónica. También los circuitos y componentes de los ordenadores se basan en las propiedades cuánticas de los semiconductores, pero a la hora de construirlos debemos seguir reglas propias de la tecnología de los componentes electrónicos aunque esto puede cambiar si se desarrollan los ordenadores cuánticos. Por todo ello es posible defender la existencia de una unidad conceptual de la ciencia, partiendo del modelo de las ciencias naturales, y al mismo tiempo de una diversidad de las disciplinas en cuanto

a su objeto y a sus métodos, que han ido elaborándose de forma pragmática a lo largo del tiempo. Todo ello se puede realizar sin renunciar a la búsqueda del rigor científico.

Una demostración de la diversidad de la ciencia nos lo proporciona la necesidad de hacer una clasificación de las disciplinas en la ciencia actual que, por otra parte, requiere de aproximaciones cada vez más multidisciplinares. No obstante, este tipo de clasificaciones se ha vuelto imprescindibles para muchas actividades de política científica como la evaluación de los proyectos de investigación, la promoción de investigadores o docentes o para tratar de estructurar la gestión de las universidades o la investigación científica.

La clasificación más empleada es la que propuso la Unesco en 1973, que ha ido siendo revisada y ampliada. Divide las ciencias en 24 grandes capítulos que incluyen, entre otras, las matemáticas, la física y la química, las ciencias de la vida, las ciencias sociales y la filosofía. De forma numérica se van delimitando disciplinas más específicas[2].

Funciones de la investigación científica

Esta diversidad de la ciencia la encontramos también en las finalidades para las que se lleva a cabo la investigación científica y que son también múltiples. Si seguimos el desarrollo histórico de la ciencia como hemos hecho en el capítulo precedente, deberemos afirmar que la primera finalidad de la ciencia es procurarnos datos y teorías que nos permitan comprender el mundo en el que vivimos. Por tanto, deberíamos afirmar que la primera función de la ciencia ha sido y será proporcionar conocimiento del mundo material en el que vivimos, incluyendo a los humanos como especie biológica y como sociedad. Ello implica seguir planteándose las grandes

2. En muchos países esta clasificación ha sido adoptada de forma oficial; por ejemplo, en España el Gobierno la emplea desde los años ochenta. Véase https://www.ciencia.gob.es/portal/site/MICINN/menuitem.8ce192e94ba842bea3bc811001432ea0/?vgnextoid=363ac9487fb02210VgnVCM1000001d04140aRCRD

cuestiones que han sido el motor de la ciencia desde sus inicios, por ejemplo el origen y la dinámica del universo, la estructura de la materia o la evolución de las especies; pero también responder a las necesidades que las sociedades humanas se han planteado como el acceso a la comida o el tratamiento de enfermedades. En los tiempos recientes a estas preocupaciones se han añadido las relacionadas con el impacto de las actividades humanas sobre el entorno.

La historia demuestra que en el curso de la investigación sobre estas grandes cuestiones a menudo aparecen observaciones inesperadas que son las que dan paso a nuevas ideas. Por ello, predecir los resultados de la ciencia es un objetivo irrealizable y de hecho las ideas más interesantes han sido, por definición, aquellas que no podrían ser predichas. Por las razones anteriores una gran parte de la investigación científica está guiada por la curiosidad misma del investigador o investigadora. A menudo este tipo de investigación es la que se denomina *ciencia básica* o *ciencia no orientada* y es una parte importante de la investigación que se realiza en los laboratorios públicos.

En la sociedad actual una parte importante de la competitividad de las empresas se basa en su capacidad de innovar. Esta puede darse en los productos que se ofrecen o en la manera como estos se producen. Y la innovación puede ser la última etapa de una cadena que comienza con la investigación básica y pasa por la investigación que busca nuevos desarrollos para dar lugar a productos innovadores. Este es un proceso complejo cuya optimización está en el centro de muchos debates actuales. Como consecuencia de la presión dirigida a una economía competitiva, una parte de la investigación actual está orientada a nuevos productos y formas de producirlos. A menudo denominamos este tipo de investigación como investigación aplicada o tecnológica y en general se lleva a cabo en los centros de investigación de las empresas, aunque estas pueden también contratarla en los laboratorios públicos.

Sabemos actualmente que conseguir que el éxito en el proceso de trasladar la investigación básica hasta aplicaciones que puedan llegar al mercado en forma de nuevos productos

es una parte importante de la competitividad de las sociedades modernas; por esta razón, en muchos países se definen planes de investigación que definen prioridades en la investigación y se ponen en marcha procesos de valorización económica de la investigación.

Funciones de asesoramiento y reflexión

Sin embargo, las funciones de la ciencia van a menudo más allá de la investigación básica y la aplicada. En nuestras sociedades actuales la ciencia es importante para la toma de decisiones a nivel personal y a nivel colectivo. Se ha dicho que un 60% de las decisiones políticas en la actualidad tienen algún tipo de contenido científico. En estas condiciones aquellos que deben tomar decisiones se dirigen a la comunidad científica para preguntar cuál es el estado del conocimiento en alguna materia, y el deber del científico es responder de la mejor manera posible a estas preguntas. A una reflexión sobre las modalidades de esta actividad dedicamos los capítulos 7 y 9. Las preguntas que dirigen quienes toman decisiones a los científicos pueden hacerse de forma puntual o sistemática. Baste tener en cuenta que las instituciones políticas se ocupan de regular muchos aspectos de nuestra alimentación, de nuestra salud o del medioambiente, sin hablar de la industria en sus múltiples aspectos como en el uso de nuevas tecnologías digitales o de telecomunicación. Estas regulaciones requieren establecer, por ejemplo, qué actividades o productos pueden afectar a la salud o al medioambiente. La función del científico en este contexto puede ser necesaria en diferentes etapas, ya sea en el momento de definir el propósito de una norma y su marco de aplicación, o bien puede necesitar desarrollar métodos de análisis necesarios para vigilar el cumplimiento de las normas o en el análisis de los diferentes casos que se producen en la aplicación de la norma.

Un buen ejemplo de regulaciones en las que se requiere la presencia de expertos en las diferentes etapas de la evaluación

de seguridad y eficacia son los productos farmacéuticos. Desde aquella aspirina a finales del siglo XIX, pasando por los antibióticos o los anticonceptivos que fueron apareciendo durante el siglo XX, estamos utilizando una gran variedad de sustancias que sirven para tratar o prevenir enfermedades o aspectos de nuestra salud. Sabemos por experiencia que la forma o la dosis en que se tomen los fármacos es esencial para que sus efectos sean los apropiados. La conciencia de lo importante de este análisis apareció con los efectos del fármaco denominado talidomida, que se usó hacia los años cincuenta y sesenta del siglo pasado para prevenir las náuseas en mujeres durante el embarazo. Se observó que algunos de los nacidos de estos embarazos tenían malformaciones en sus extremidades. Ello llevó a detener el uso de este fármaco y a compensar a quienes habían sufrido los efectos. Como consecuencia de ello se establecieron unos procedimientos para la aprobación de un nuevo fármaco, los ensayos clínicos, de los que cada año se realizan millares en distintas partes del mundo. Para la aprobación de un fármaco se constituyen comités de expertos que analizan los datos obtenidos durante los ensayos clínicos y si estas son convincentes se aprueba la administración del fármaco en unas condiciones concretas. Generalmente, es necesario también establecer sistemas de vigilancia posterior para tratar de detectar problemas que se presenten en su uso masivo. Para todo ello la presencia de profesionales con una buena experiencia científica en este tipo de procedimientos es imprescindible.

Puede ocurrir también que un descubrimiento científico esté en el origen de la necesidad de tomar decisiones políticas. Un buen ejemplo de ello lo encontramos en las que se tomaron para la reducción del agujero en la capa de ozono, que se observó en los años setenta. En aquel tiempo un conjunto de observaciones meteorológicas descubrieron que la capa de ozono que se encuentra en la estratosfera entre 10 y 50 kilómetros sobre la superficie terrestre estaba experimentando una reducción muy acusada. Esta capa absorbe parte de la radiación ultravioleta emitida por el Sol y por tanto evita sus

efectos nocivos sobre la piel; por ejemplo, su reducción puede dar lugar a un incremento en las enfermedades de la piel. Una investigación muy rigurosa y original, por la que sus autores ganaron el Premio Nobel de Química en 1995, concluyó que la causa de esta reducción en la capa de ozono eran las emisiones de sustancias que se utilizan en los sistemas de producción del frío, los CFC (productos clorofluorocarbonados). Esta demostración llevó a que se aprobara la prohibición de estas sustancias en el Protocolo de Montreal de 1987 que firmaron y ratificaron todos los países que forman las Naciones Unidas. Tras la aplicación de esta prohibición, la capa de ozono ha ido recuperándose. En todas las etapas del proceso la presencia y asesoramiento de científicos fue esencial. En la actualidad, los trabajos de los científicos que trabajan en el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, como discutiremos en el capítulo 7, son indispensables en la toma de decisiones relacionadas con este tema de incuestionable importancia actual.

Incluso en los casos en los que no hablamos de regulaciones o leyes, la opinión de profesionales de la ciencia puede ser importante para los ciudadanos cuando se trata de utilizar nuevas tecnologías. Los ciudadanos necesitan disponer de una buena información científica para tomar decisiones que pueden tener gran importancia en sus vidas. Se ha dicho que en los últimos tiempos la forma como comenzamos nuestra vida y como la terminamos han sido profundamente alteradas y en ello las nuevas tecnologías médicas han sido un factor esencial.

Nos podemos remontar a la generalización de los anticonceptivos que han proporcionado a las parejas, y a las mujeres principalmente, una vía para decidir el momento en que desean tener hijos. Pero también las técnicas de fecundación in vitro están permitiendo a parejas con problemas de fertilidad resolver su problema. También se han desarrollado métodos de diagnóstico genético que pueden proporcionar a la pareja que está esperando descendencia información sobre posibles alteraciones genéticas en el embrión, incluso antes de

su implantación en el útero. Por tanto, a las parejas se les presentan incluso antes del nacimiento de sus hijos preguntas para las que deben tener una buena información que deben valorar en función de sus propias referencias ideológicas o religiosas. Al final de la vida se presentan también opciones complejas sobre tratamientos que permiten aliviar el sufrimiento, prolongar la vida y, en algunos casos, finalizarla. Son decisiones difíciles en las que la información científica es esencial tanto a nivel personal como social. Que a las personas interesadas les llegue la información que necesitan con el mayor rigor y honestidad posible es una tarea de importancia creciente para la comunidad científica.

En este entorno se han constituido en muchos países grupos de reflexión que tratan de analizar los avances científicos y ofrecer criterios de actuación. El primero de ellos fue el Comité Consultivo Nacional de Ética, creado en el año 1983 en Francia, al que le siguieron por instancias similares en diferentes países y en organizaciones internacionales como Unesco o el Consejo de Europa. Sus funciones son muy diversas y dependen en gran parte de los sistemas legales y políticos de los países, pero en general tratan de reflexionar sobre diferentes aspectos, no únicamente técnicos y legales, del uso de las nuevas tecnologías, sino también de los valores personales o sociales que pueden estar en juego y de proponer recomendaciones acerca de su uso. En estos comités, la presencia de científicos, junto a profesionales de otros ámbitos como el filosófico o el jurídico, es esencial para disponer de un conocimiento lo más exacto posible del estado de la ciencia en cada momento. La consulta a este tipo de comités se realiza no solo en los usos de las nuevas tecnologías médicas, sino también en muchos otros ámbitos como el de las tecnologías de la información o de tratamiento de datos, como se discutirá en el capítulo 9. Los científicos deben estar por tanto preparados para responder con la mejor información posible cuando se les presentan preguntas en este tipo de órganos de reflexión.

CAPÍTULO 3

Dónde y quién hace la investigación científica

La universidad

Poca ciencia se hace actualmente en casa del científico. Es posible que con la extensión del teletrabajo, algunas tareas de redacción de proyectos y resultados y de consulta a las publicaciones se puedan hacer de forma aislada. La ciencia actual necesita de equipos humanos y de instalaciones adecuadas y estos se encuentran en centros de investigación de naturaleza diversa. En términos generales, podemos distinguir centros de investigación públicos y privados que en general acogen a personal que es pagado también mediante fondos públicos y privados, aunque existe una gran casuística de iniciativas mixtas públicas y privadas.

En el entorno público podemos distinguir dos grandes tipos de instituciones en las que se realiza la investigación. En primer lugar, debemos tener en cuenta a la universidad y, en segundo lugar, centros concretos o grupos de centros en los que se lleva a cabo investigación de forma prioritaria. La universidad tiene desde luego como primer objetivo la docencia superior y así ha sido desde la fundación de las primeras instituciones universitarias en la Edad Media.

La actual estructura de las universidades proviene del siglo XIX, aunque ha ido evolucionando de forma rápida

durante el siglo pasado y de forma diversa en los diferentes países. Sin embargo, en todos ellos existe alguna institución en la que se forman aquellos que ejercerán las profesiones que necesitan unos niveles más intensos y especializados de adquisición de conocimientos. En los primeros tiempos eran las disciplinas de la filosofía las que se enseñaban de forma preferente, pero pronto aparecieron en otras disciplinas como facultades de Medicina, por ejemplo. En la actualidad existe una enorme variedad de ellas lo que ha propiciado su clasificación según diferentes sistemas. Uno de ellos, el de Times Higher Education, identifica 1.250 universidades en el mundo, lo cual es probablemente un número muy inferior al existente, ya que algunos informes hablan de la existencia de más de 10.000. Quizá la clasificación más conocida es la de Shanghai Ranking Consultancy, que clasifica 1.800 universidades. Muchas de ellas tienen una función de formación en un número reducido de temáticas aunque la mayoría de las más prestigiosas abarcan la docencia en la mayoría de las disciplinas respondiendo a su vocación de universalidad. Se habla también de las universidades con intensidad en la investigación que suelen ser las que aparecen en los lugares más elevados en los *rankings*. Son buenos ejemplos de ello universidades americanas como el Massachusetts Institute of Technology (MIT) fundado en 1861 y situado en Cambridge, cerca de Boston, o el California Institute of Technology (Caltech), fundado en 1891 en Pasadena, un barrio de Los Ángeles, o los Politécnicos Federales suizos, en particular el de Zúrich (ETHZ), fundado en 1854, aunque algunas de las universidades más antiguas del mundo como las de Oxford y Cambridge se sitúan sistemáticamente en los primeros lugares de todas las clasificaciones. Desde hace tiempo la capacidad para llevar a cabo investigación de calidad se considera una de las funciones esenciales de la universidad, y en la mayoría de los países las universidades son los lugares preferentes para llevar a cabo investigación, sobre todo la investigación en ciencia básica.

Que la universidad sea uno de los lugares preferentes para realizar investigación científica parece algo natural. La

misión de la institución universitaria es poner en contacto a los jóvenes, o al menos a una minoría de ellos, con el conocimiento más actualizado sobre el conjunto de disciplinas que forman un área de conocimiento o que se consideran necesarias para ejercer una profesión determinada. Aquellos que enseñan deben estar en contacto con los últimos datos disponibles en las ciencias respectivas y ello en teoría puede hacerse sin hacer investigación, pero si el que ejerce una función docente la tiene también en investigación suele ser una garantía de una mejor calidad en la transmisión de los conocimientos más actualizados. Uno de los corolarios de este razonamiento es que en las universidades en las que se enseñan materias muy diversas, que son la mayoría de las clásicas, se debería realizar investigación en todas ellas. Ello puede ser interesante para su función docente, pero en la actual situación de la investigación científica que necesita recursos poderosos que se obtienen de forma competitiva es una meta difícil de alcanzar.

Las instalaciones científicas singulares

La universidad difícilmente puede hacer investigación en todos los temas y puede ocurrir que sea necesario desarrollar investigaciones en temas muy específicos, algo que puede ser difícil de llevar a cabo en el entorno generalista de las universidades. Por esta razón, en muchos países del mundo se han creado centros de investigación que son organismos dedicados a la investigación científica a menudo dirigidos a una especialidad determinada. Esta idea procede también de antiguo. Por ejemplo, una institución científica que existe desde hace siglos son los jardines botánicos. El que se considera más antiguo es el de Padua, fundado en 1545 para conservar plantas medicinales. Instituciones similares se fundaron en toda Europa en particular para reproducir y aclimatar plantas que los descubridores traían de sus viajes por el mundo. El Jardin des Plantes de Montpellier y el de París, los Kew Gardens ingleses o los diferentes jardines de palmas que se han conservado

en muchos países de Europa atestiguan el interés por ellos. En España, el jardín botánico con más larga historia es el de Valencia, del que se conserva la memoria desde 1567. El Real Jardín Botánico de Madrid fue fundado en 1755. Para la ciencia puede ser emblemático el jardín botánico de Uppsala, en Suecia, fundado en 1655 y del que fue director Carl Linneo, quien lo organizó siguiendo la clasificación de las especies que había propuesto. En la actualidad, los jardines botánicos son lugares para que los ciudadanos puedan gozar de la contemplación de la variedad de las especies vegetales, pero son también instituciones de investigación científica en las que se trabaja en la conservación de especies amenazadas, en el estudio de las bases de la diversidad vegetal y algunos de ellos en la mejora de plantas.

Otro ejemplo de continuidad de este tipo de instituciones son los centros de conservación de semillas. La mejora de las plantas cultivadas requiere de acceso a la variabilidad mayor posible de semillas de las plantas que están en la base de nuestra alimentación. Por ello se constituyeron desde hace tiempo centros de conservación de semillas sobre todo después de la Segunda Guerra Mundial con el impulso de fundaciones privadas y fondos públicos. Actualmente hay bancos de semillas muy diversos y una red internacional que está federada bajo el paraguas del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), compuesto por 17 centros repartidos por todo el mundo y en la que figuran entre otros el Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y el Trigo (CIMMYT) situado en México, el Centro Internacional de la Papa (CIP) en Perú o el International Rice Institute (IRI) en Filipinas. Un ejemplo último de la estrategia de conservación de colecciones de semillas de plantas cultivadas ha sido la apertura de la llamada "bóveda del fin del mundo" en las islas Svalbard. En este lugar remoto, caracterizado por bajas temperaturas, se están almacenando millares de semillas que deberían representar lo necesario para poner en marcha de nuevo la agricultura en caso de algún gran desastre mundial acabara con las plantaciones agrícolas de forma súbita.

Quizá las más antiguas instituciones de investigación sean los observatorios astronómicos. Se trata de instalaciones de observación de los astros que existían desde tiempos prehistóricos y siguen siendo un buen ejemplo de centros de investigación. De hecho, los observatorios astronómicos se han multiplicado en los últimos decenios permitiendo la observación del universo no solo en la luz visible sino en todo el espectro electromagnético, y últimamente para la observación de las ondas gravitatorias. En la actualidad hay centenares de ellos con finalidades y posibilidades muy diversas. Su complejidad y coste necesita a menudo la colaboración de varios países como es el caso de Observatorio Europeo del Sur, que ha agrupado en las montañas del norte de Chile, donde el aire tiene una claridad excepcional, varios de los instrumentos más modernos para la observación de los objetos celestes. Por la misma razón se lanzó en 1990 el telescopio en órbita Hubble, una iniciativa entre Estados Unidos y Europa para realizar observaciones por encima de la atmósfera terrestre.

El caso de colaboración internacional que se pone siempre como modelo es el de los instrumentos para la realización de experimentos de altas energías que son necesarios para comprender la estructura más íntima de la materia. El ejemplo de mayor complejidad nos lo proporcionan los aceleradores de partículas como los del Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN), organización internacional fundada en 1954 y que ha construido y mantiene en funcionamiento el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), uno de los instrumentos de investigación científica más complejo que se ha construido nunca. El CERN lo gestionan 23 países europeos con otros países asociados. Tiene un presupuesto anual de unos 1.200 millones de euros y en él trabajan más de 17.000 personas de más de 70 países entre científicos, técnicos y administrativos.

En el mundo hay actualmente centenares de infraestructuras de experimentación y observación científica, muchas de ellas públicas. En Europa se ha constituido el Foro para las Infraestructuras Científicas (ESFRI) para tratar de diseñar una estrategia común para este tipo de instalaciones. Y además se

está construyendo el que puede ser la mayor instalación experimental del mundo, el proyecto ITER, financiado por varios países, entre ellos la Unión Europea, y que se propone construir el primer ejemplo de reactor de producción de energía basado en la fusión nuclear.

El ejemplo más actual de las instalaciones científicas singulares es el de aquellas que dan apoyo a las bases de datos. El aumento exponencial en la adquisición y conservación de datos es una de las características de la ciencia moderna. En biología, las observaciones de análisis de imágenes y las secuencias de ADN se han multiplicado de forma exponencial en los últimos años. Un ejemplo del tipo de centro que es necesario para manejar estos datos lo proporciona el Instituto Europeo de Bioinformática, que pertenece al Laboratorio Europeo de Biología Molecular, una organización internacional europea con sede en Heidelberg y que tiene distintos laboratorios con funciones diversas de apoyo a la investigación en biología molecular. Se convirtió desde el inicio en uno de los polos globales en el almacenamiento y uso de los datos de ADN. Como se discutirá en el capítulo 8, los centros en los que se depositan los datos digitalizados que producen los experimentos se han convertido en infraestructuras esenciales para la ciencia moderna.

Los centros de investigación

Existen también centros de investigación con misiones específicas a menudo ligados a las grandes infraestructuras o a veces a universidades. Se trata de instalaciones donde grupos de investigación pueden desarrollar su trabajo en un entorno que debería estar pensado para hacerlo más eficiente porque disponen de instrumentación o de materiales específicos o porque se crea en ellos un entorno que estimula la reflexión entre profesionales. Existen muchos modelos distintos de centros de investigación. Algunos de ellos son de financiación únicamente pública o de organizaciones sin ánimo de lucro; otros están

financiados por empresas o grupos de empresas, y existen también centros de investigación de financiación mixta.

Dejando aparte los casos particulares descritos con anterioridad, los centros de investigación comparables a los que existen en la actualidad comenzaron a fundarse durante el siglo XIX y principios del XX cuando la importancia de llevar a cabo investigaciones sobre temas determinados surgió en distintas partes del mundo. Un buen ejemplo es la estación de investigación agrícola de Rothamsted, en Reino Unido, que se fundó en 1843 y que sigue en funcionamiento. En aquel momento algunos pensaron que investigar para tener una agricultura eficiente era una necesidad imperiosa y se creó esta, y con posterioridad muchas otras estaciones. Por el mismo tiempo (1841) se abrió cerca de Nápoles el Osservatorio Vesuviano para seguir la actividad del volcán Vesubio, que sigue en activo con la misma finalidad. Entre los ejemplos emblemáticos de centros de investigación prestigiosos se encuentran algunos que proceden de donaciones privadas como el Salk Institute en San Diego, fundado en 1960 por Jonas Salk, o la Fundación Campomar fundada en Buenos Aires con el dinero de Luis Leloir quien recibiría el Premio Nobel de Química en 1970. En Israel el Weizmann Institute en Rehovot se creó en 1934; en la India el Bhabha Atomic Research Center sucede al Tata Institute for Fundamental Research fundado en 1945, o en Brasil la Fundación Oswaldo Cruz creada en 1900 en Río de Janeiro y el Instituto Butantan fundado en 1901 en São Paulo son testigos de los esfuerzos privados por establecer la ciencia en lugares muy distintos del mundo. Todos ellos han tenido una gran influencia en sus respectivos países.

Un grupo de centros de investigación son los ligados a hospitales o a la investigación médica. Uno de los más antiguos es el Instituto Karolinska en Estocolmo, Suecia, fundado en el año 1810 para el entrenamiento de los cirujanos y que sigue siendo una de las instituciones más prestigiosas del mundo en investigación médica. En Francia, el legado de Louis Pasteur incluye el Instituto Pasteur, fundación independiente fundada en 1887 y que sigue siendo una institución de referencia

mundial. También en Francia se creó el INSERM en 1964 para financiar la investigación que se realiza en los hospitales, y en Reino Unido el Medical Research Council (MRC) con la misma finalidad. Por su parte, en Alemania se fundó el Instituto Robert Koch en 1891, que es actualmente en centro de referencia alemán para cuestiones de salud como en Estados Unidos es el Center for Disease Control (CDC), fundado en 1946 en Atlanta. Los National Institutes of Health (NIH) en Estados Unidos financian varios centros de investigación y proyectos competitivos en universidades y hospitales. En la actualidad, en los grandes hospitales del mundo encontramos centros de investigación que se cuentan entre los más activos en este tipo de investigaciones. Este es el caso de Estados Unidos; en la mayoría de los países europeos, incluido España, en el entorno de la mayoría de los grandes hospitales se han abierto centros de investigación y existen redes de investigación médica cuya financiación, en España por ejemplo, es una de las actividades del Instituto Carlos III. Su presencia en el entorno hospitalario es una garantía de que los avances en científicos lleguen lo más rápidamente posible a los pacientes que los necesitan.

Es posible que uno de los mejores ejemplos de la importancia que han tenido los centros de investigación para la ciencia de un país haya sido el conjunto de centros que actualmente constituye la Sociedad Max Planck en Alemania. Su inicio como Sociedad Kaiser-Wilhelm data de 1911, en tiempos del Imperio alemán, que al año siguiente abriría dos institutos de investigación en el barrio de Dahlem, en Berlín, donde siguen existiendo diversos centros con la actual denominación de Institutos Max Planck. Actualmente, la Sociedad Max Planck financia unos 90 institutos presentes en toda la geografía alemana y algunos en el extranjero. En ellos trabajan 23.000 personas, entre las que se incluyen unos 6.000 científicos. De ellos, 300 aproximadamente son directores con función vitalicia a los que la sociedad, que tiene una financiación esencialmente pública, proporciona medios generosos para llevar a cabo su investigación. Existen institutos de

las más diversas disciplinas en ciencias naturales y sociales cuyas orientaciones van variando con el tiempo y, por ello, alguna vez algún director de un centro termina su mandato, el grupo de investigación se puede cerrar para crear otro de una disciplina que la sociedad considera que es importante en el momento. En el año 2018 la Sociedad Max Planck disponía de una financiación de 1.800 millones de euros.

Centros de investigación u organizaciones de centros existen en la mayoría de los países del mundo. En Europa existen organizaciones multidisciplinarias; la más antigua de estas es el Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), fundado en 1923. El Centre National pour la Recherche Scientifique (CNRS) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) se fundaron en 1939. Se trata de organizaciones con estructuras y misiones distintas que agrupan a varios millares de investigadores en centros dedicados a disciplinas diversas. En los países del este de Europa, la organización de centros se había realizado alrededor de las academias de ciencias. En el caso de la de la Unión Soviética había llegado a tener más de 300 institutos con 200.000 empleados. Tras la caída de la Unión Soviética, se fue desmantelando la estructura de la Academia y en los diferentes países de su órbita que habían creado estructuras similares se han efectuado reformas a diferentes niveles.

Un modelo similar existe en China, donde los institutos de la Academia China de Ciencias, con 60.000 investigadores, forman la mayor institución de investigación del mundo. Es la sucesora de la Academia Sinica, fundada en 1928 y que se trasladó a Taiwán en 1949. En los países de Latinoamérica se han desarrollados también estructuras en las que se combina según los casos la gestión de personal, proyectos y centros. Se trata del CONICET en Argentina, el CONACYT en México, el CONICYT en Uruguay y Chile (actualmente la ANID), el CNPq en Brasil o Colciencias en Colombia, lo que indica el interés que ha existido por la investigación científica en esa región. También en Australia se fundó en 1916 el CSIRO como organización de centros de investigación. Existen también organizaciones de centros más especializados, como

por ejemplo los dedicados a temas de salud ya mencionados anteriormente, y otras organizaciones de investigación oceanográfica, agraria, del espacio, etc. La investigación nuclear ha sido también un ejemplo de centros de investigación creados durante el siglo XX que estaban también relacionados con el desarrollo del armamento atómico y de los usos pacíficos de la energía nuclear.

Como hemos dicho, también las grandes empresas han ido creando centros de investigación de los que nutren sus productos más innovadores. Tradicionalmente, un buen ejemplo han sido las industrias farmacéuticas. En la actualidad, las grandes empresas de tecnologías digitales han construido centros de investigación, esencialmente en Estados Unidos, pero también en Japón y en China. Un ejemplo histórico de este tipo de centros son los Laboratorios Bell en Estados Unidos, fundados en 1925 por la compañía telefónica Bell, y donde se realizaron importantes descubrimientos en física, como por ejemplo el dominio de los semiconductores. Progresivamente estos laboratorios dejaron la investigación básica y se convirtieron en centros de desarrollo de compañías de teléfonos. Existen también centros de investigación dirigida a empresas o a apoyar proyectos de desarrollo tecnológico.

En su conjunto, los centros de investigación proporcionan a su personal un entorno que no pueden tener grupos individuales como una formación continuada y una visibilidad social hacia el público, las empresas y también hacia la comunidad científica internacional, lo que implica oportunidades para su personal y sobre todo para su personal en formación. La revista *Nature* publica cada año un *ranking* de centros de investigación en el mundo según el número de artículos científicos que publican en las disciplinas de las ciencias naturales[3]. En el de 2019, publicado en 2020, figura en primer lugar la Academia China de Ciencias, seguida por la Universidad de Harvard, en Estados Unidos. En los diez

3. Véase https://www.natureindex.com/annual-tables/2020

primeros lugares figuran también la Sociedad Max Planck alemana y el CNRS francés, la Universidad de Stanford, el MIT, los institutos Helmholtz de Alemania, dos universidades chinas y la de Oxford, en Reino Unido. El CSIC es la única institución de investigación española entre los 100 primeros clasificados. Diez grandes países: Estados Unidos y China en primer lugar, Alemania, Reino Unido y Suiza en Europa, Japón y Corea del Sur en Asia, junto con Canadá y Australia, concentran el mayor número de centros de investigación en términos de publicaciones científicas. Las grandes universidades y las organizaciones de centros de investigación acaparan desde hace años los primeros lugares de estas listas y es de destacar el crecimiento continuado de las organizaciones de China en este conjunto de clasificaciones.

Las profesiones de la ciencia. Los equipos de investigación

La investigación científica la llevan a cabo equipos de investigadores que pueden ser individuales, pero también pueden ser muy complejos e implicar a centenares de profesionales con experiencias muy diversas. La imagen del científico que trabaja solo en su laboratorio hace tiempo que ha desaparecido y como máximo se ha transformado en la figura del investigador principal, el responsable más visible del equipo investigador. Este acostumbra a aglutinar equipos que pueden contar con investigadores con experiencias y niveles de formación diferentes y que incluyen a quienes están realizando sus tesis doctorales. Según la Unesco[4], en 2013 había en el mundo unos 7,8 millones de investigadores científicos, un número que habría crecido un 21% desde 2007.

Se ha dicho que el número de científicos actuales es mayor que la suma de todos los que han existido en el mundo

4. En https://en.unesco.org/unescosciencereport

desde el inicio de la ciencia. El mayor número de ellos sigue estando en la Unión Europea seguida de China y Estados Unidos que, junto con Japón y Rusia, representan el 72% de los profesionales de ciencia que trabajan actualmente en el mundo. El número de investigadores por habitante es uno de los indicadores que marcan la diferencia entre los países en cuanto a su capacidad para producir ciencia. Y esta capacidad tiene repercusión en la competitividad de la economía y en la calidad de su docencia sobre todo a los niveles universitarios. Un debate de actualidad es la existencia todavía de sesgos en la proporción de los investigadores según su procedencia y su género, que se analizará en el capítulo 5.

La carrera típica de un investigador científico comienza en general en sus estudios universitarios, que la persona joven escoge en función de sus intereses personales. La vía de entrada tradicional hacia la práctica de la ciencia suelen ser los estudios de ciencias, ingeniería o humanidades, aunque encontramos ejemplos de todo tipo entre los investigadores. La tesis doctoral que se realiza tras los estudios universitarios es actualmente un requisito prácticamente indispensable para acceder a profesiones científicas. De hecho, el mismo trabajo de tesis doctoral es ya en sí mismo un trabajo de investigación y como tal es considerado en la mayoría de los países en los que la tesis se realiza con la persona disfrutando de una beca o un contrato. Tras la tesis doctoral suele ser recomendable pasar periodos postdoctorales en centros distintos e incluso en países distintos al propio y acostumbra a ser el periodo en el que el investigador comienza a desarrollar sus propios programas generalmente en el marco de una beca o un contrato de carácter temporal. Dependiendo de los países, los puestos de trabajo en universidades y centros de investigación en los que el profesional desarrolla sus ideas y forma sus equipos se conceden de forma competitiva entre postdoctorales calificados. Según la legislación o la tradición de cada país estos contratos pueden ser temporales, indefinidos o vitalicios.

LA TESIS DOCTORAL

La investigación científica la realizan personas y estas tienen funciones muy diversas que varían según el tipo de investigación que se hace. La ciencia desde hace tiempo la realizan equipos complejos constituidos por personas con experiencias muy distintas, que pueden haber recibido también niveles de formación diversos. En el caso de los investigadores, y en particular aquellos que tienen una función de dirección o supervisión de los requerimientos para el investigador, es la tesis doctoral. La formación del docente a nivel universitario y del investigador científico ha seguido vías muy diversas en las distintas tradiciones educativas. Sin embargo, la realización de una tesis doctoral ha ido imponiéndose en la mayoría de los países del mundo. Aunque se pueden encontrar excepciones de interés, en la actualidad la mayoría de los investigadores tienen una formación universitaria que toma la forma de una licenciatura, o de un grado y un máster como se está generalizando en muchos países. Ello implica entre tres y seis años de formación según las disciplinas. Tras esta formación, la realización de una tesis doctoral es la etapa formativa más generalizada.

El doctorado tenía también formas muy diversas en los diferentes países, donde a menudo implicaba el acceso a la función de docente. Actualmente se ha convertido en un requerimiento para esta función y para la función investigadora. Una tesis doctoral implica la redacción de un texto en el que se exponen las conclusiones de un trabajo de investigación que haya realizado el candidato bajo la supervisión de uno o varios investigadores. En la actualidad se considera aceptable en muchos países que este texto consista en una colección de trabajos ya publicados. En cualquier caso implica una demostración de la capacidad para llevar a cabo un trabajo de investigación que se culmina con su publicación. La suficiencia de lo publicado para alcanzar el título de doctor es evaluada por un tribunal constituido por miembros que posean ellos mismo la titulación de doctor.

El doctorado es de esta forma un periodo de entrenamiento en la realización de una investigación original que se realiza bajo la supervisión de un investigador habilitado para ello y culmina con la publicación de los resultados. Durante este periodo el doctorando suele seguir cursos especializados, pero es también una oportunidad para aprender a analizar

críticamente la literatura científica existente, a redactar artículos y proyectos, a presentar en público sus resultados y a esperar las críticas de sus colegas, para adquirir una perspectiva internacional de la ciencia y una formación sobre el método científico y las buenas prácticas en la investigación. El título de doctor no lleva asociado el acceso a una función investigadora o docente, pero sí un reconocimiento de la capacidad para realizar una investigación. Por esta razón, puede ser también valorado para el acceso a funciones de dirección de equipos en empresas o instituciones privadas.

Actualmente se debate el tipo de contrato que liga al investigador con su institución. En los modelos de las universidades que se constituyeron a lo largo del siglo XIX un profesor de universidad en su nivel más elevado, el catedrático, disponía de una consideración de funcionario de alto nivel. Se trataba de un reconocimiento a su función docente, pero también una garantía de la libertad de cátedra reconocida en muchos países. La consideración de cargo vitalicio para profesores de universidad e investigadores reconocidos se ha mantenido en la mayoría de los países en los que se reconoce también la gran especialización a la que se llega después de años de estudios y que necesita una estabilidad en el empleo. La tendencia actual en algunos países ha sido la de ir separando esta consideración de la de funcionario, evitando así las rigideces que esta consideración tiene[5]. El tipo de contratos de los investigadores de los diferentes niveles ha ido también evolucionando. La beca para realizar el doctorado o incluso el postdoctorado que no incluía derechos laborales ha ido evolucionando hacia contratos laborales, aunque sean de duración limitada.

La investigación científica actual suele necesitar de la realización de observaciones, experimentos o de tratamientos

5. En España, las universidades y organismos públicos de investigación están constituidos por funcionarios, pero existen también programas de contratación de investigadores como el ICREA (https://www.icrea.cat/) en Cataluña y el Ikerbasque (https://www.ikerbasque.net/) en el País Vasco que son vitalicios, tienen una evaluación periódica y han atraído a investigadores de alta calidad.

de datos complejos que requieren de un entrenamiento técnico especializado. Por ello, en los equipos de investigación suele tener una participación esencial personal técnico cuya responsabilidad está dirigida a la ejecución de tareas especializadas. En los grandes equipamientos de investigación la tarea de los equipos técnicos es la clave para su buen funcionamiento y en los equipos en que se realizan experimentos con materiales específicos, el personal técnico es el que proporciona la base material para la experimentación. En biología, disponer de animalarios, bancos de células o invernaderos con animales, células o plantas bien caracterizados y en las cantidades necesarias puede ser un trabajo muy complejo y el personal técnico es el encargado de ello. El manejo de equipos de experimentación no es exclusivo de las grandes instalaciones, sino que en los laboratorios existen multitud de equipos de diferentes tamaños que requieren de una experiencia técnica que es esencial para su buen funcionamiento. Vista la especialización de algunos experimentos y su uso en muchos laboratorios distintos, en estos momentos existen empresas que ofrecen sus servicios para externalizar una parte del trabajo experimental de los grupos de investigación. En las técnicas de ADN, por ejemplo, tanto en la síntesis como la secuenciación es esta una solución muy habitual. Si los centros de investigación son complejos, el personal técnico de mantenimiento es indispensable para que la infraestructura funcione correctamente.

Los grupos de investigación y los centros en los que están integrados requieren también de una buena gestión de sus recursos. Por ello otro elemento clave en su buen funcionamiento es el personal de gestión que implica personal que apoya a la hora de redactar, gestionar y justificar los proyectos y los recursos asignados a ellos. Personal de secretaría, de recursos humanos o de contabilidad son parte de estos equipos de gestión, que pueden incluir también especialistas en valorización de la investigación con experiencia en la negociación de contratos con empresas y de comunicación al gran público. Un conjunto de personas con funciones distintas, bien definidas y bien coordinadas ofrecen al personal científico el entorno

ideal para que se lleve a cabo su trabajo de forma eficiente. La función de los directores de centros o de departamentos universitarios es lógicamente muy valorada en los entornos de la ciencia actual.

El ciudadano como actor de la ciencia

La profesión de científico necesita de un entrenamiento largo y complejo y su trabajo se expresa mediante un lenguaje que al ciudadano en general le puede parecer lejano y críptico. Es el precio que se paga por el rigor científico en muchas disciplinas científicas. Ello hace que el científico aparezca a menudo como un profesional lejano y extraño y puede llegar a reducir la confianza que el ciudadano tiene hacia la ciencia. Ocurre también que ciertas investigaciones necesitan de gran cantidad de personal que esté muy ligado al territorio. Es el caso de la investigación naturalística en la que se necesita trabajo de campo. Puede ocurrir también que en la investigación se requiera la participación de personas para probar un tratamiento o un medicamento; es lo que ocurre en los ensayos clínicos. En todos estos casos es necesario que participen ciudadanos de forma pasiva o, cada vez más frecuentemente, de forma activa. Por ello se ha acuñado el término de ciencia ciudadana que engloba un conjunto de actividades científicas en las que el ciudadano que no es profesional de la ciencia es un actor principal de las mismas[6].

Siguiendo esta tendencia a la participación activa de los ciudadanos es cada vez más frecuente en todo el mundo en diferentes ámbitos de la ciencia. En el caso de los ensayos clínicos, su reglamentación está dirigida en primer lugar a proteger la salud de los participantes, pero de forma creciente estos piden ser informados de las condiciones, los objetivos y los resultados de los ensayos. Existen asociaciones de pacientes que son muy activas en este ámbito y que participan en algunos

6. También ha dado lugar a asociaciones que promocionan este tipo de actividades, como la plataforma para el intercambio de proyectos de Ciencia Ciudadana, recursos, recursos, herramientas y formación, en https://eu-citizen.science/

niveles de la evaluación de los fármacos y sus usos. Esta situación es especialmente significativa en los casos en los que la investigación utiliza fondos financiados por algún grupo de ciudadanos para que se lleve a cabo algún tipo de proyecto y por tanto los promotores desean que se les tenga en cuenta en las prioridades de los proyectos financiados o en su desarrollo.

En el ámbito del medioambiente existen redes de ciudadanos y de asociaciones que tienen una actividad importante en la generación de observaciones por ejemplo de poblaciones de animales o plantas. Se trata de grupos de ciudadanos con un conocimiento cercano del territorio y que proporcionan información detallada sobre el entorno ecológico de alguna región. Estas observaciones pueden ser las únicas que existan sobre la diversidad biológica de sus regiones respectivas y ser de gran valor para su conocimiento, sobre todo en una situación en la que se observan cambios en el clima y que preocupan sus efectos sobre los equilibrios ecológicos a nivel local.

Existen también experiencias en algunos países en los que se ha pedido a los ciudadanos su opinión sobre las prioridades en la investigación científica, lo cual es una referencia importante cuando existen recursos limitados. Puede ser también interesante tener en cuenta la opinión de los ciudadanos en aplicaciones que pueden acabar afectando su vida. Esta implicación temprana de los ciudadanos debería ayudar a gestores e investigadores a decidir sus temáticas de trabajo. Se ha propuesto también que se podría implicar a los ciudadanos en la realización de los experimentos científicos; sin embargo, muchos de estos requieren de un conocimiento que implica una gran profesionalización. En cualquier caso, mucha de la investigación que se realiza en el mundo se financia con fondos públicos y por ello es comprensible que tanto organizaciones científicas como investigadores respondan de su uso ante los ciudadanos. La celebración de reuniones en las que los investigadores explican su trabajo al público y recogen sus sugerencias se ha generalizado en muchos países, pues para el científico explicar al ciudadano lo que hace y escuchar sus inquietudes se ha convertido en una parte de su actividad profesional.

CAPÍTULO 4

Cómo se investiga y cómo se publica

El método científico

El trabajo de un profesional de la ciencia se realiza actualmente siguiendo una metodología que ha ido elaborándose y haciéndose explícita a lo largo de los siglos. Podemos volver al periodo del Renacimiento en Europa en el que las diferentes sociedades europeas van emergiendo de lo que llamamos Edad Media, un periodo complejo. La sociedad europea está entonces mayoritariamente dominada por el pensamiento religioso que toma la forma de la filosofía escolástica, una transformación del pensamiento formulado por Aristóteles en la Grecia clásica. Los resultados de la ciencia del Renacimiento que se sustentan en nuevas observaciones, nuevos métodos y nuevas teorías entran en colisión con las viejas ideas. La difícil aceptación del modelo copernicano de la estructura del sistema solar es una buena prueba de ello. Desde el siglo XVII se desarrollan las nuevas ideas de la ciencia que surgen en paralelo con una reflexión filosófica sobre los conceptos básicos en los que fundamentamos nuestro conocimiento. Preguntas sobre a qué denominamos la verdad, la razón o la sabiduría están en la base del trabajo de filósofos como Francis Bacon o René Descartes, que tratan de construir una nueva filosofía sobre bases alejadas de la autoridad escolástica reinante. El

rechazo a una autoridad impuesta de forma dogmática es otra de las características de la filosofía que subyace en la formación de la ciencia moderna.

La ciencia a partir de aquella época va distanciándose de la religión y de ciertas formas de la filosofía, sobre todo de la metafísica. Puede decirse que los que se interesan por la ciencia acaban admitiendo que los principios dogmáticos en los que se basan las religiones son incompatibles con el pensamiento científico. Esta distancia queda bien definida en la famosa respuesta del físico Pierre-Simon de Laplace a Napoleón. Laplace fue un científico muy reconocido en su época y una de sus obras principales fue el *Tratado de mecánica celeste*. A su publicación, Laplace fue convocado por el emperador, con el reproche de que en todo su libro no mencionara ni una sola vez la existencia de Dios. Se cuenta que Laplace respondió: "Señor, es una hipótesis que no necesito". Esta actitud es la que los científicos han ido adoptando desde entonces. Ello no quiere decir que no haya científicos que no sean practicantes de alguna religión. La revista *Nature* ha ido haciendo con cierta periodicidad encuestas entre científicos y ha concluido que aproximadamente un 25% de ellos declara creer en la existencia de un ser divino. Sin embargo, la actitud expresada por Laplace es la que guía al científico en su trabajo, independientemente de sus convicciones íntimas.

La ciencia también fue adquiriendo una actividad autónoma respecto de la filosofía, y ya el término de filosofía natural deja de utilizarse progresivamente para ser sustituido definitivamente por el de ciencia en el siglo XIX. Disciplinas filosóficas clásicas como la cosmología o la antropología se van convirtiendo progresivamente en capítulos de la física o la biología. Por su parte, algunas de las reflexiones filosóficas se alejan de la ciencia, en particular las que se reconocen como metafísica. Esta tendencia podía crear una oposición directa entre disciplinas, algo que se daba ya en el siglo XVIII. Se puede citar como ejemplo de ello la posición radical del filósofo escocés David Hume sobre esta cuestión: "Si tomamos en nuestra mano cualquier volumen, de teología o

metafísica escolar, por ejemplo; preguntémonos: ¿contiene algún razonamiento abstracto sobre la cantidad o el número? No. ¿Contiene algún razonamiento experimental, en relación con la realidad y la existencia? No. Lancémoslo entonces sobre las llamas: porque no puede contener nada más que engaño e ilusión".

Sobre todo a principios del siglo XX se da una reacción en algunos círculos filosóficos que rechazan como pura especulación algunas de las reflexiones de la metafísica mientras que otros consideran la ciencia como una actividad esencialmente práctica. Ello no quiere decir que a lo largo de los años los filósofos no se hayan ocupado de ciencia y de las bases de su razonamiento. Un buen ejemplo de ello lo tenemos en Emmanuel Kant, que trata de definir espacios de pensamiento para las matemáticas, la ciencia natural y la metafísica. Junto con la consolidación de la física moderna se da también el nacimiento de corrientes filosóficas que se proponen encontrar un compromiso entre el pensamiento científico y el filosófico. Durante el siglo XX se desarrolla la filosofía de la ciencia, que propone ideas para comprender cuál es la especificidad del método científico. Algunos de sus autores tuvieron una gran influencia en la formulación de las teorías modernas de la física, como la mecánica cuántica. Autores como Karl Popper o Thomas Kuhn, por citar solo dos nombres representativos, han tenido una gran influencia en explicitar el método científico. Otros autores se han ocupado de la ciencia desde perspectivas sociológicas o psicológicas tratando de aclarar los mecanismos que permiten a la comunidad científica la formación de sus teorías.

La filosofía de la ciencia se ocupa de definir términos como aquello que consideramos una ley de la naturaleza, aquello que consideramos verdad y cómo se construyen estas a partir de las observaciones realizadas. Estas reflexiones han influido profundamente en la investigación científica, que se ha ido cristalizando en un conjunto de prácticas que implican una independencia radical de pensamiento y la no aceptación de ideas absolutas, y que incluyen la duda sistemática ante cualquier afirmación tanto experimental como teórica.

Siguiendo estas reflexiones, lo que llamamos el método científico parte de observaciones iniciales, formulación de hipótesis y justificación de estas mediante experimentos y argumentos. Estos argumentos son objeto de confrontación y debate constante en el interior de la comunidad científica. Las reglas del método científico son en principio generales y universales, pero en la práctica se adaptan a la metodología de cada disciplina y del tipo de pregunta que los investigadores se plantean, por ejemplo si se trata de un estudio teórico o aplicado. Son también la base de lo que denominamos buenas prácticas, que serán discutidas en el capítulo 7. El científico no puede dejar de ser consciente de las bases metodológicas de su trabajo ni de los valores éticos en los que se enmarca este. Por ello, la colaboración de la comunidad científica con la filosofía en, al menos, la fundamentación de los aspectos metodológicos y éticos de su trabajo debería ser constante.

La formulación de las hipótesis a partir de las observaciones que se realizan es un proceso en el que juegan factores personales y sociales de los investigadores. Aristóteles había propuesto que se trataba de un proceso de inducción en el que se llegaba a lo universal a partir de observaciones particulares. Tanto psicólogos como sociólogos se han acercado a este, que se parece a menudo a la creación artística. De hecho, en física y matemáticas la belleza de una teoría ha llegado a ser un argumento para su aceptación. En la práctica, el profesional de la ciencia puede emprender el problema que desea resolver con una buena dosis de emoción. Tratar de responder a una pregunta que está abierta puede ser sentido por aquel que la aborda como un acto de creatividad. Y una vez se halla una respuesta, la persona que la ha encontrado puede defenderla con pasión. Ciertamente estos son aspectos que parecerían alejados de una definición aséptica del método científico, pero el investigador se halla a menudo personalmente inmerso en su tarea. Los debates apasionados entre concepciones distintas de alguna disciplina son parte de la vida cotidiana de la ciencia. A apaciguarlos no ayuda la competencia por reclamar la prioridad en las ideas o por el acceso

a fondos de proyectos que puede existir entre diferentes grupos de investigación y que puede estar dándose en la actualidad de forma especialmente aguda.

Los proyectos de investigación

En la actualidad la forma en que se desarrolla la investigación implica la formulación de ideas, la constitución de equipos de investigación y la disponibilidad de materiales y métodos que permitan llevar a cabo los experimentos, observaciones y tratamiento de datos que se requieren para tratar de resolver la cuestión planteada. Toda esta actividad se lleva a cabo en un entorno institucional y material determinado que aporta los recursos necesarios a los investigadores. Existen instituciones que se comprometen a proporcionar a sus profesionales aquello que necesitan para su trabajo. Este ha sido el caso hasta la actualidad de organizaciones de investigación como la Sociedad Max Planck o el CNRS. En el pasado era también el caso en las universidades u organizaciones como el CSIC. Sin embargo, de forma progresiva se invita a los profesionales de la ciencia a que soliciten los recursos que necesiten a fondos competitivos a través de convocatorias de proyectos. La atribución de estos medios está fuertemente influenciada por un conjunto de decisiones que dependen de la disponibilidad de fondos económicos y de prioridades que son definidas de forma directa o indirectamente política.

Un proyecto de investigación consta en general de una descripción de aquello que los que lo presentan consideran que es el estado de la cuestión, ya sea en términos de una disciplina concreta o en términos de unas prioridades determinadas. Un proyecto debe presentar unas hipótesis en relación con los objetivos fijados y un conjunto de actividades dirigidas a probar la hipótesis. Estas actividades pueden ser un conjunto de experimentos que se proponen como objetivos para demostrar o falsear la hipótesis que se propone y un plan de trabajo que siga la metodología que se considere más apropiada para conseguir

los objetivos. Finalmente, un proyecto incluye siempre una descripción de la experiencia del equipo que propone el proyecto. Esta experiencia se considera una importante garantía de éxito y un componente de ella es el *curriculum vitae* de quien o quienes presentan el proyecto.

Un proyecto de investigación suele tener un horizonte temporal determinado y responder a las condiciones de las convocatorias que ofrecen financiar los proyectos en función de los recursos disponibles. Los proyectos son evaluados por los mecanismos previstos en las convocatorias. Esta evaluación suele incluir un análisis mediante lo que se conoce como la "revisión por pares". Ello quiere decir que otros investigadores del mismo campo de investigación son llamados a conocer los términos del proyecto y dan su opinión sobre su calidad en función del conjunto de ideas, experimentos y experiencia que se presentan. Los criterios que se utilizan serán discutidos en el capítulo 5. Uno de los instrumentos más utilizados en la actualidad a este respecto es el de la convocatoria de proyectos mediante la cual se atribuyen unos fondos a centros, grupos o individuos para que desarrollen una investigación durante un periodo determinado. Una convocatoria implica unas bases, una evaluación y una decisión de concesión. Como en general los fondos que se distribuyen son limitados, la convocatoria implica una competición entre proyectos. La competición entre individuos y entre instituciones es uno de los aspectos característicos de la investigación científica moderna.

Un ejemplo de este tipo de convocatorias es el proporcionado por los programas de investigación de la Unión Europea, que se encuentran entre los más complejos y generosos en términos económicos. Entre 2014 y 2020 esta dedicó 80.000 millones de euros a financiar proyectos de investigación. Los objetivos declarados del programa vigente hasta 2020, denominado Horizon 2020[7], son financiar la investigación, con el objetivo de que esta tenga la mayor calidad posible, y proporcionar nuevas ideas a la ciencia.

7. Véase https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/h2020-sections

En este programa se puede encontrar, en primer lugar, un capítulo dedicado a la ciencia calificada de excelencia. Su capítulo más significativo es el dedicado al Consejo Europeo para la Ciencia (ERC), del que se hablará más tarde, y a las acciones para apoyar las tecnologías nuevas y emergentes, llamadas Acciones Maria Sklodowska-Curie, que financian a investigadores particulares, generalmente jóvenes, que desean trabajar en otros países o a redes de laboratorios para la formación de jóvenes investigadores. Un tercer capítulo de la ciencia de excelencia es el apoyo a las grandes infraestructuras europeas (ESFRI), mencionado anteriormente. Aparte de financiar la ciencia solamente en función de su calidad, existen grandes acciones para apoyar el liderazgo industrial europeo en las cuales la Unión Europea decidió priorizar las tecnologías de la información y la comunicación, el espacio y las nanotecnologías. Un capítulo adicional está dedicado a la investigación sobre los grandes retos sociales, entre los que identifica la salud, la alimentación, la energía, el transporte o el clima y cuestiones sociales relacionadas con los cambios sociales o la relación entre seguridad y libertad. Otros capítulos están dedicados al vínculo entre ciencia y sociedad, al establecimiento de redes de laboratorios, a la innovación o a la energía nuclear de fusión. El Programa Marco Europeo es uno de los mejores ejemplos de las acciones de los poderes públicos a través del apoyo económico a la investigación, que puede ser decidido por su calidad intrínseca o por estar orientada a cuestiones que la Unión Europea considera relevantes por su impacto en la industria o en la sociedad. Es de destacar también la importancia que estas acciones tienen en Europa para la formación de jóvenes investigadores o para la colaboración entre laboratorios de diferentes países.

La financiación del ERC nos permite observar cuáles son los temas que son considerados más relevantes para la ciencia actual. Para ello el ERC divide su evaluación en un conjunto de paneles agrupados en tres grandes áreas: ciencias

físicas e ingeniería, ciencias de la vida y ciencias sociales y humanidades[8].

Esta clasificación, realizada por el Consejo Científico del ERC, ofrece una de las mejores perspectivas del panorama actual de la ciencia. Los proyectos del ERC se atribuyen en tres tipos de ayudas dirigidas a investigadores jóvenes, consolidados o confirmados, categorías que se establecen de acuerdo al tiempo que transcurrió para el investigador principal del proyecto a partir de la finalización de la tesis doctoral. En el año 2019 el ERC representó el 17% del presupuesto total de investigación de la Unión Europea: unos 2.000 millones de euros que se repartieron en más de 1.000 proyectos. Este conjunto de proyectos constituye una de las mejores visiones de la ciencia que se realiza en este momento en un continente que sigue siendo relevante en ciencia.

Los proyectos que se conceden suelen incluir financiación para diferentes aspectos de la actividad científica. Pueden incluir fondos para contratar personal, en general investigadores jóvenes con carácter temporal, pero también para completar los salarios de los investigadores. Pueden incluir la financiación para adquirir los materiales, el instrumental, los servicios indispensables para el trabajo experimental, de tratamiento de datos o bibliográfico, los viajes para llevarlos a cabo, para reuniones y congresos o para publicaciones. En la concesión de las ayudas puede especificarse a qué capítulos van destinados los fondos o dejar la decisión al investigador principal responsable del proyecto.

La publicación científica

Una investigación científica no existe hasta que no se publica. Este es un hecho inherente a la misma actividad de la ciencia. Un resultado de la investigación necesita de la deliberación y

8. Cada una de estas grandes áreas se divide en un número de paneles cuya estructura para los años 2021 y 2022 puede consultarse en https://erc.europa.eu/sites/default/files/document/file/ERC_Panel_structure_2021_2022.pdf

aceptación de otros científicos para demostrar su validez. Pero la ciencia es también una actividad universal que necesita ser conocida por otros para poder proseguir en el conocimiento que requiere de la elaboración de hipótesis que se basan en ideas previas. La publicación de los resultados de la ciencia puede hacerse en reuniones de científicos. Históricamente, las academias de ciencias tuvieron una participación destacada en los inicios de la ciencia moderna con reuniones en las que se podía levantar acta de los estudios presentados. De manera progresiva se fueron organizando congresos y reuniones de diferentes tipos algunas veces muy numerosas en las que se pueden presentar resultados. Otras reuniones de trabajo son más específicas y están destinadas a intercambiar metodologías, resultados e ideas en disciplinas más concretas, lo que puede ser más relevante en temáticas emergentes. Los congresos científicos han ido moviendo a millares de profesionales por los distintos destinos del mundo; hay que mencionar que en algunos casos han sido decisivos en la evolución de la ciencia. Puede destacarse un buen ejemplo en los primeros años del siglo XX en los Congresos Solvay que se celebraban en Bruselas. Durante algunos años reunieron a la gran mayoría de científicos que estaban trabajando en la creación de la mecánica cuántica y de la física moderna en general. Otra conferencia famosa fue la de Asilomar en 1975, en la que se discutieron las condiciones en las que se podían utilizar las nuevas tecnologías del ADN recombinante.

En la actualidad la publicación científica se realiza mayoritariamente en alguna de las 33.000 revistas científicas escritas en inglés y las 9.000 en otras lenguas que existen el mundo, que tienen una variedad muy grande y que conforman una gran industria. Se ha calculado que la publicación científica mueve al año unos 26.000 millones de dólares (lo cual es una cifra más de un tercio superior a la del mercado mundial de la industria musical) y emplea a unas 150.000 personas en el mundo, el 40% de las cuales se encuentra en la Unión Europea. Hay unas 10.000 editoriales que publican estas

revistas, pero unas 650 son las más influyentes, la mitad de las cuales son sociedades científicas o académicas. Las revistas científicas publican unos tres millones de artículos al año, que han ido creciendo entre un 3 y un 4% anualmente en los últimos tiempos. Muchas de las revistas están dedicadas a publicar trabajos de disciplinas concretas, ya sean amplias o muy especializadas. Existen también publicaciones multidisciplinarias que se dirigen a un público científico de base amplia. Dentro de estas últimas, las revistas *Nature*, *Science* o *PNAS* (*Proceedings of the National Academy of Sciences*) están entre las más valoradas.

Publicar en una revista científica sirve para cuatro funciones que tradicionalmente se han identificado como:

1. Registrar una nueva idea o un descubrimiento lo que permite al autor una vía para establecer su precedencia o incluso su propiedad.
2. Diseminar un descubrimiento o una nueva idea a la comunidad científica y al público en general.
3. Certificar que lo que se publica tiene una calidad suficiente.
4. Archivar el texto para que quede como referencia para futuros autores.

Son, por tanto, funciones esenciales para la ciencia y para el profesional de la ciencia y las instituciones que lo emplean. Por esta razón, ser autor de una publicación científica es algo de gran importancia para todos los que trabajan en investigación, por lo que tras su título suelen aparecer los autores y las instituciones para las que trabajan.

La estructura de los artículos científicos depende mucho del tipo de artículo y de la disciplina científica. Un artículo de lo que se conoce como publicación primaria, es decir, que da a conocer una investigación nueva y no se trata de una revisión de otros artículos, suele tener una estructura bastante definida. Comienza por una introducción en la que los autores ponen su trabajo en el contexto de la ciencia del momento,

reconociendo las aportaciones de autores anteriores, y describen la finalidad del trabajo que se presenta y las hipótesis que se han querido plantear. Los artículos de ciencias físicas y biológicas suelen contener un apartado en el que se describen los métodos empleados y los materiales que se han utilizado en la investigación. A este apartado le sigue un capítulo de resultados de los experimentos que se han realizado con los datos obtenidos, para finalizar con un debate de estos resultados que conduce a unas conclusiones finales. Los artículos científicos contienen también una lista de referencias a otros anteriores, a los que se reconoce como autores predecesores en el campo disciplinario concreto y en el uso de métodos que se han empleado. Otro tipo de artículos que son importantes en el entorno de complejidad en el que se mueve la ciencia actual son los de revisión. En ellos, en formatos distintos, se publica un análisis del estado en el que se encuentra una disciplina con el conjunto de publicaciones que los autores de la revisión consideran más relevantes.

Los mecanismos de aceptación y publicación de estos tienen también matices importantes según la revista. Sin embargo, el procedimiento más habitual se basa en una evaluación de su contenido que es responsabilidad de un consejo editorial que puede ser profesional, depender de una sociedad científica o ser elegido por la editorial tras consultar entre científicos del campo al que va dirigida la revista. El consejo editorial suele hacer un primer filtrado de los artículos que recibe, tratando de asegurarse de que el manuscrito sea formalmente adecuado para su publicación. La evaluación se hace generalmente mandándoselo a científicos del área de interés, los cuales deben emitir una recomendación sobre si puede publicarse o no, o si se deben aportar modificaciones al contenido o a la forma. Como se discutirá en el capítulo 8, este procedimiento, denominado evaluación o revisión por pares (*peer review*), se encuentra en evolución continua debido sobre todo al uso de las tecnologías digitales, que han alterado profundamente todo el proceso de la publicación científica. En la evaluación de los originales se tiene en cuenta

también si estos cumplen los requerimientos esenciales de un trabajo científico. En la actualidad las editoriales poseen sistemas para detectar el plagio, lo que supone una razón para el rechazo del manuscrito. Los evaluadores deben también comprobar que existen detalles suficientes para poder reproducir los resultados y que las conclusiones que se publican están suficientemente apoyadas en ellos. Actualmente es de gran importancia, por ejemplo, que los datos sean suficientes para que el análisis de los mismos proporcione resultados con significado estadístico.

Las publicaciones de las que un científico es autor son un elemento clave para su reconocimiento como profesional. Por ello, la lista de autores en una publicación y el orden en el que figuran son cuestiones de gran importancia y a veces fuente de conflictos. Sin embargo, cada disciplina científica tiene tradiciones diferentes. Es conocido que en física de partículas la complejidad de los experimentos y su análisis hacen que la lista de autores pueda llegar a algunos millares y los grandes proyectos de la biología actual pueden reunir a centenares de autores.

La propiedad intelectual

Publicar un resultado científico representa un acto de presentar a la sociedad ideas o conclusiones que proceden de un trabajo particular o de un grupo de personas. En el caso de las publicaciones científicas esto es similar a lo que hacen los artistas o escritores, que también en algún momento u otro hacen públicos sus trabajos de creación. Desde hace tiempo este hecho se considera que da derecho al autor a beneficiarse de los posibles rendimientos económicos que puedan derivarse de la comercialización de lo que se ha creado. La ciencia participa también de una forma propia de estos derechos de autor. Según la legislación de cada país, este derecho a la propiedad intelectual es individual o corresponde a la institución a la que pertenecen los autores y que financia su trabajo.

En el caso de la investigación científica este derecho está protegido sobre todo por lo que denominamos el derecho de patentes. Se trata de un concepto establecido principalmente a partir del siglo XIX, cuando se constató que el trabajo de investigación podía tener unos efectos económicos importantes y que se debería tratar de premiar a aquellos que hubiesen hecho un esfuerzo para encontrar soluciones a problemas que beneficiasen a la sociedad. Por ello se establecieron unas oficinas de patentes. Si la oficina de patentes lo considera adecuado y aprueba la patente, los autores pueden disponer de una exclusiva en los beneficios que se produzcan en la comercialización de su invención durante un tiempo determinado que puede rondar alrededor de los 30 años. Si la patente se acepta, la invención se hace pública en todos sus detalles para que otras personas puedan conocerla y eventualmente buscar nuevas soluciones o mejoras. El informe de una patente es una publicación tan relevante y detallada como las publicaciones científicas de las que hemos hablado antes.

Una patente se otorga a un inventor o conjunto de inventores si la información que se presenta en el documento de solicitud puede permitir a cualquier persona con un conocimiento suficiente la posibilidad de reproducir lo que se presenta. Debe tener también las condiciones de novedad, es decir, no puede patentarse algo que ya era conocido con anterioridad. Debe ser producto de una actividad de invención, esto es, que no pueda deducirse fácilmente del estado de la cuestión. Y ha de ser de utilidad, es decir, que pueda dar lugar a un producto de interés comercial en algún momento. Si la oficina correspondiente aprecia estas cualidades se otorga el privilegio de prioridad a los inventores, lo cual puede dar lugar a beneficios económicos que puedan ser importantes para ellos o para las instituciones para las que trabajan.

El derecho a la propiedad intelectual se aplica no sin discusiones, sobre todo en algunos campos. Tradicionalmente, sus campos de aplicación eran los más cercanos a la producción industrial, como la ingeniería o la química. En el siglo XX, con la aparición de aplicaciones de la biología, el derecho

a la propiedad intelectual se extendió a distintos campos de las ciencias de la vida. El primero fue el de los que trabajan para obtener mejores variedades de plantas para su cultivo. En 1961 se aprobó una convención internacional, la Unión para la Protección de Obtenciones Vegetales (UPOV). Esta incluye un procedimiento similar al de las patentes, pero más sencillo, y otorga derechos de uso exclusivo de nuevas variedades vegetales a aquellos que demuestran que son novedosas, contienen caracteres útiles y son estables. Otra diferencia con las patentes es que cualquier nuevo investigador puede partir de una variedad, aunque esté protegida, y trabajar sobre ella para mejorarla, y, si lo consigue, protegerla a su vez.

La primera patente de un organismo vivo se otorgó en 1980 cuando la Oficina de Patentes de Estados Unidos se la concedió a un investigador de los laboratorios de la empresa General Electric que había modificado una bacteria para que pudiera utilizarse en el tratamiento de vertidos de petróleo. Un oficial de la oficina presentó un recurso contra la patente, ya que, según la ley americana, no se pueden patentar materias vivas. El caso llegó al Tribunal Supremo de Estados Unidos, que consideró que la modificación genética de una materia aunque estuviera viva contenía los requerimientos necesarios para su protección por patentes. Desde entonces se han patentado multitud de microrganismos o metodologías de base biológica, aunque la cuestión sigue rodeada de polémica hasta nuestros días, tanto por la dificultad de separar un organismo modificado de los originales existentes como por razones basadas en visiones según las cuales nadie puede apropiarse de un organismo vivo.

El derecho de patentes es parte de la legislación de cada país. Existe en Europa una oficina de patentes con sede en Múnich[9], ante la cual se pueden también presentar las solicitudes. Se ha aprobado una patente que podría tener un ámbito de protección en los diferentes países de la Unión Europea, aunque ha habido disputas sobre las lenguas en las que se

9. Véase https://www.epo.org/index.html

pueden presentar los documentos. A nivel internacional la propiedad intelectual es uno de los temas que constituye la razón de ser de la Organización Mundial del Comercio. Los tratados que constituyen esta organización incluyen el llamado TRIPS (Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights), que trata de unificar los conceptos de propiedad intelectual a nivel global e incluye un tribunal para regular los conflictos.

CAPÍTULO 5

Quién financia la ciencia

La inversión en ciencia y tecnología

Una de las maneras de saber dónde se hace ciencia en el mundo es a través de los indicadores globales de gasto en ciencia y desarrollo en los diferentes países. De hecho, esta es una de las finalidades del *Manual de Frascati* ya mencionado. No es tan sencillo definir lo que se considera gasto en investigación científica y un indicador bastante aceptado es el gasto global en relación al PIB. La OCDE publica de forma periódica un conjunto de datos que tratan de medir el gasto que los países realizan en investigación tanto desde el sector público como por parte de las empresas[10].

De estos datos pueden deducirse las grandes diferencias que existen entre los países desarrollados. Destacan por su gasto superior Corea del Sur, Israel y los países del norte de Europa mientras que los países del sur y el este del continente tienen niveles de inversión muy inferiores. El gasto en investigación y desarrollo que se da en España no es, en el momento de redactar este libro, aquel que, para muchos de los que se ocupan de la ciencia, corresponde a una sociedad del

10. Para el año 2019, por ejemplo, se puede seguir la evolución de los diferentes países miembros de su organización en su informe, en https://www.oecd.org/sti/msti2019.pdf

desarrollo económico y del entorno europeo en el que se encuentra[11].

LA CIENCIA EN ESPAÑA

De entre los grandes países europeos, España no destaca por su contribución a la ciencia como lo ha hecho en pintura o literatura. La pregunta se la han hecho múltiples investigadores en el pasado y nos la seguimos haciendo a menudo. Si nos interesamos en la historia de la ciencia veremos que entre Raimon Llull en el siglo XIII y Santiago Ramón y Cajal a principios del siglo XX, que es la gran época de la creación de la ciencia moderna, encontramos pocos nombres de primera línea procedentes de España que podamos destacar. Los historiadores de la ciencia han estudiado la recepción en España de las ideas de Copérnico, Galileo o Newton en los siglos XVI y XVII, el impacto que tuvieron en Europa el descubrimiento de América y las expediciones que se organizaron con posterioridad lideradas por naturalistas españoles o el interés con que Sociedades y Ateneos recibían las nuevas ideas de la ciencia durante el siglo XIX. De forma regular aparecen nombres españoles haciendo contribuciones de interés en los debates que se producen. Sin embargo, no se trata de contribuciones que puedan verse, con razón o sin ella, como decisivas para el desarrollo de la ciencia, como pueden ser las de Llull o Ramón y Cajal.

Se ha argumentado que el pensamiento español estaba inmerso en la Contrarreforma cuando se desarrolló la ciencia moderna y que la Inquisición cortaba de raíz cualquier idea que pudiera parecer contraria a la doctrina católica. También se ha argumentado que la riqueza que llegaba de América pasaba a través de España hacia los grandes banqueros europeos dejando una estela de inflación y de desprecio por el trabajo austero y constante que está ligado con la filosofía y la ciencia. En el siglo XVIII no se produce en la mayoría de España la Revolución Industrial que acompaña el desarrollo de ciencia y técnica en la Ilustración, En el XIX los vaivenes entre visiones escolásticas y liberales impiden la cristalización de la mentalidad científica como ocurre en otros

11. La situación de la ciencia española puede ser seguida por informes de fundaciones del Gobierno (https://icono.fecyt.es/), independientes (https://cotec.es/) o de sociedades científicas (https://cosce.org/).

países. Esta contradicción la encontramos de forma constante en la cultura que se desarrolla en España, donde sigue resonando la frase que Miguel de Unamuno escribió en una carta a José Ortega y Gasset en 1906: "Yo me voy sintiendo profundamente antieuropeo. ¿Que ellos inventan cosas? Invéntenlas". Era el mismo año en el que Santiago Ramón y Cajal ganaba el único Premio Nobel otorgado a alguien por un trabajo científico realizado en España. La tensión de entonces se mantiene ahora.

Ciertamente, Ramón y Cajal aparece como un representante único del científico español a principios del siglo XX. Su influencia es crucial en aquella época, tras serle concedido el Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1906. Consigue de las autoridades de su tiempo la formación de la Junta de Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas, que fue el inicio de la carrera de millares de jóvenes científicos que pudieron desplazarse al extranjero para formarse en las disciplinas de la ciencia moderna. Desde aquel momento histórico hasta la actualidad, la historia de la ciencia española es la de hacer y deshacer leyes y organismos que no terminan de cristalizar en una estructura sólida y consolidada. La Junta de Ampliación de Estudios tiene una vida difícil en tiempos de la dictadura de Primo de Rivera entre 1923 y 1930, revive con posterioridad a ella, pero tras la Guerra Civil el régimen franquista se ensaña con su legado de personas e institutos. Sin embargo, pervive un núcleo resistente que enlaza con nuevas generaciones que dan lugar, durante la apertura que representaron los Planes de Desarrollo a partir de los años sesenta y de la transición política a partir de 1975, a un renacimiento de la ciencia en las universidades y en el CSIC, que se forma en parte de la herencia de la JAE. Los vaivenes de la política científica española no se detienen. Las leyes de la ciencia de 1985 y 2011 y algunas actuaciones como la creación de los programas Ramón y Cajal y Severo Ochoa, son intentos de racionalizar la estructura científica. A épocas de aumento en la financiación suceden recortes indiscriminados. A ello hay que añadir la existencia de acciones de investigación en las autonomías, en particular en Cataluña y el País Vasco, que a menudo ponen en marcha sistemas alternativos de gestión y financiación de este campo. También han sido significativas las oportunidades que se han dado a la ciencia española tras la entrada de

España en la Unión Europea en 1986. Los vaivenes en su impulso en España siguen impidiendo que ocupe el lugar que le correspondería en la creación científica.

Los indicadores que se proponen en estos informes son generales y revelan las grandes tendencias de la inversión en investigación y desarrollo de los países. De forma concreta, la investigación científica se financia a través de mecanismos que han ido siendo establecidos a lo largo del tiempo con modelos distintos que dependen de las estructuras económicas, políticas y culturales de los distintos países.

Agencias y fundaciones

La investigación científica necesita de fondos tanto para remunerar al personal que trabaja en sus laboratorios y departamentos como para pagar por los materiales o servicios que se requieren para llevarla a cabo y que pueden ser muy costosos. De los datos obtenidos se deduce que estos costes pueden representar un porcentaje significativo del PIB de los países. Esta financiación puede tener una parte fija, que implica la financiación de personal estable o infraestructuras de diferentes tipos, y una parte variable, que suele llevarse a cabo mediante proyectos que se atribuyen de forma competitiva. Se considera que la etapa fundacional de la política científica que estructura en términos generales la mayoría de la actividad investigadora actual la debemos datar en 1945, cuando el director de la Oficina de Investigación Científica y Desarrollo de Estados Unidos, Vannevar Bush, escribió un informe al presidente de Estados Unidos que se tituló "La ciencia, la frontera sin fin", en el que detallaba las bases de la acción del Gobierno federal sobre ciencia. De ahí nació en 1950 la National Science Foundation (NSF), que sigue siendo una de las principales fuentes de financiación de

los grupos estadounidenses de investigación a través esencialmente de convocatorias competitivas.

La mayoría de los países cuyos gobiernos financian la ciencia con fondos públicos han desarrollado organizaciones que realizan convocatorias de acuerdo con criterios propios. En Europa existe una organización de agencias financiadoras, Science Europe, que está formada por 36 organizaciones de 27 países. También la Unión Europea creó un consejo de investigación (European Research Council) como organización autónoma de la Comisión Europea, cuya actividad ha sido ya descrita con anterioridad. Este tipo de organizaciones se ha establecido para ofrecer una gestión más eficaz y flexible de los fondos públicos, distinta de los procedimientos que las administraciones públicas utilizan para otras finalidades. La investigación científica es muy diversa en el tipo de usos que realiza de los fondos públicos, como contratos a corto plazo, adquisición de materiales o servicios muy específicos, uso de infraestructuras o pago de publicaciones, que son diferentes en cada disciplina o incluso en cada proyecto. Al mismo tiempo, es difícil prever con exactitud el tipo de gastos que se necesita cuando se habla de investigar algo que no se conoce. Por ello, las administraciones públicas han desarrollado organizaciones específicas para la gestión de los fondos de investigación. La NSF es un buen ejemplo, pero también lo pueden ser los *councils* británicos, que tienen objetivos temáticos distintos como la medicina, la física, etc. Otro ejemplo es la alemana DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft), sociedad independiente gestionada por universidades, centros de investigación y sociedades científicas a la que el Gobierno alemán y los estados federados facultan para la distribución de los fondos de investigación, que en 2019 fueron de más de 3.000 millones de euros. En Portugal existe una agencia para el apoyo a la investigación en todas sus áreas que fue fundada en 1997, la FCT (Fundaçao para a Ciéncia e a Tecnologia), que asume las acciones de financiación del Estado en Portugal para la investigación científica. En Francia se ha constituido recientemente

la ANR (Agence Nationale pour la Recherche) y en España la AEI (Agencia Estatal de Investigación), con esta finalidad. Un ejemplo interesante es la brasileña FAPESP (Fundaçao de Amparo à Pesquisa do Estado de Sao Paulo), fundada en 1962 y que por la constitución del Estado de São Paulo asume la gestión de forma independiente del 1% de todas las tasas que colecta ese gran estado brasileño.

Existen también un buen número de fundaciones privadas que tienen un impacto importante en la financiación de la ciencia. En Estados Unidos es una tradición bien establecida con buenos ejemplos como la Fundación Rockefeller o la Fundación Ford, que fueron muy importantes en la primera mitad del siglo XX, y en la actualidad la Fundación Bill y Melinda Gates, que utiliza fondos procedentes de fortunas personales. Esta última es en estos momentos la mayor financiadora de proyectos de investigación relacionados con la salud y la alimentación de los países menos desarrollados. En Europa hay también una tradición de mecenazgo en los países nórdicos como la Fundación Carlsberg, fundada en 1876 en Dinamarca por el propietario de una fábrica de cerveza, o la Fundación Nobel, que se creó en 1900 para gestionar la fortuna de Alfred Nobel y que otorga cada año los conocidos Premios de Ciencias, Literatura y la Paz. En algunos casos los fondos provienen de los beneficios de empresas como la Wellcome Trust Foundation en Reino Unido, creada en 1936 por los fundadores de la empresa farmacéutica Wellcome y que es uno de los principales financiadores de la investigación biomédica en Reino Unido, o Novo-Nordisk en Dinamarca, con fondos procedentes de una empresa farmacéutica. En España existen buenos ejemplos de fundaciones bancarias —por ejemplo, la Fundación "la Caixa" o la del BBVA— o de donaciones personales, como la Fundación Ramón Areces o la Juan March. Existen también iniciativas como la Fundació de la Marató de TV3, la televisión pública de Cataluña, que recoge donaciones voluntarias de ciudadanos y que tiene un impacto significativo en la investigación biomédica.

La financiación de la investigación por empresas

Una parte significativa de la investigación que se realiza actualmente es financiada por empresas. El *Manual de Frascati* hace recomendaciones a los gobiernos sobre cómo se puede hacer una medición de la contribución de las empresas privadas al esfuerzo de investigación de los países. En el informe de la OCDE del 2019 citado antes se calcula que globalmente entre sus países miembros el 70% del gasto en investigación lo realizan las empresas y el 30% los gobiernos. Es por tanto una parte mayoritaria del esfuerzo de investigación, aunque en su práctica totalidad se trata de investigación aplicada o de proyectos de desarrollo industrial. Este gasto puede realizarse en el interior de las empresas, en las que en algunos casos existen potentes centros de investigación muy a menudo en contacto con los centros de investigación públicos. Esta investigación en empresas es a menudo estimulada por los poderes públicos, que ven en ella una forma de mejorar la competitividad de las empresas. El estímulo se puede hacer mediante exenciones fiscales, créditos o, más raramente, subvenciones.

Otra vía para realizar una investigación de interés para una empresa es que esta la contrate a empresas de servicios o a centros públicos. Existen muchas maneras de ejercer una colaboración entre empresas y centros públicos, que van desde proyectos conjuntos de investigación a la simple contratación de un servicio determinado que provee un laboratorio de investigación. Existen centros de investigación establecidos para responder a esta demanda, que pueden ser centros tecnológicos especializados en un tipo de tecnología determinada o centros que disponen de distintos servicios a los que pueden acudir diferentes tipos de empresas. Esta investigación se realiza mediante un contrato que especifica el trabajo y las condiciones económicas y de publicación de los resultados. Según la naturaleza de los centros de investigación, la investigación contratada puede ser una parte importante del trabajo que se realiza en él.

Otra forma en la que los investigadores pueden intervenir en la actividad de empresas es a través de las empresas *spin-off*, cuya regulación es también distinta en diferentes países. A menudo, una *spin-off* es una empresa que tiene como finalidad explotar un resultado científico generado por la investigación pública que en general está protegido por una patente. Muchos países tienen vías para estimular la creación de este tipo de empresas, ya que ha demostrado ser una forma de acelerar la llegada de un resultado científico al mercado. La participación de los investigadores, especialmente si se trata de profesores de universidad o investigadores públicos, es también objeto de regulación en los diferentes países.

La evaluación de la ciencia

Puede defenderse que el conocimiento científico no tiene un valor en sí mismo y sobre todo no lo tiene de forma inmediata. Sin embargo, los profesionales de la ciencia están siendo evaluados de forma continuada. Ello es debido a que el mantenimiento de las instituciones de investigación, el financiamiento de proyectos de forma competitiva, la contratación y la promoción de los profesionales de la ciencia tiene un coste económico que necesita una justificación. Este coste puede proceder de las haciendas públicas y por tanto sus gestores trabajan con la exigencia de una utilización correcta de los fondos. Lo mismo ocurre con los financiadores privados que desean que los fondos sean utilizados de la forma más eficiente posible. Por tanto, se trata de distinguir entre proyectos o entre personas cuáles son los que tienen una mayor probabilidad de llevar a cabo un trabajo de investigación que puede producir una ciencia de mayor calidad o que dé resultados acordes con los objetivos que se han marcado. Ello implica evaluar el trabajo realizado o el que se propone realizar.

Los proyectos de investigación han sido discutidos en el capítulo 4 y suelen tener como mínimo dos elementos evaluables. Uno de ellos es el trabajo que se pretende realizar. Si se

trata de investigación básica cuyo objetivo es producir nuevas ideas, hay varios factores a analizar. Uno de ellos es cómo la investigación propuesta se coloca en el entorno del estado de la cuestión y si esta es relevante en este contexto. Otro factor es la hipótesis que se formula y cuáles son los métodos para probarla. Criterios como la novedad y el uso de medios apropiados se utilizan en este aspecto. El otro gran criterio de evaluación es la capacidad del equipo investigador para llevar a cabo el proyecto y, para ello, la trayectoria profesional del equipo solicitante, que incluye el *curriculum vitae* de la persona o personas que forman parte del mismo, es esencial.

En la evaluación existen dos grandes tendencias. Una de ellas es el uso de la llamada evaluación por pares, que es de carácter sobre todo cualitativo. Esto quiere decir que profesionales del campo de investigación en el que se enmarca el proyecto son llamados para que formulen su opinión sobre los aspectos de novedad, relevancia y factibilidad del proyecto. A menudo, y sobre todo en los casos en que se trata de ofrecer un contrato o una promoción a un profesional de la ciencia, una entrevista con las personas candidatas suele ser de gran importancia. Escoger al conjunto de evaluadores para ejercer esta tarea es el factor esencial para que la evaluación pueda ser la más correcta. Los conflictos de intereses que se presenten en cada caso pueden ser uno de los aspectos más delicados a tener en cuenta y serán discutidos son posterioridad.

La segunda gran tendencia para la evaluación de la ciencia se basa en el uso de índices cuantitativos de medición. Un ejemplo de los más utilizados es el llamado índice de impacto que se atribuye a las revistas científicas. Se trata de un índice basado en las veces que los artículos publicados en una revista científica son citados en otros artículos. Uno de ellos lo realiza la empresa Clarivate de servicios científicos, que publica cada año estos índices para 12.000 revistas de las ciencias naturales y sociales. Ya que pueden variar mucho de una temática a otra, aunque solo sea por el tamaño de la comunidad científica en cada una de ellas, se presentan clasificados en 236 disciplinas y ordenados en cada una de ellas. La

misma empresa gestiona la llamada Web of Science, en la que pueden analizarse las publicaciones que se efectúan por temática o por autor. Existen otras webs similares como Google Scholar o Scopus, gestionada por la empresa editorial Elsevier. Estos análisis dan lugar a índices diversos, como es el caso de llamado índice h, propuesto en 2005 por el físico Jorge Hirsch y que calcula las veces que los trabajos de un autor son citados por sus colegas. Este índice se utiliza de forma muy generalizada como una manera de evaluar el impacto de las publicaciones de un científico concreto.

Los índices se han utilizado para llevar a cabo evaluaciones de científicos y de proyectos de forma aparentemente objetiva. Sin embargo, las limitaciones de esta manera de evaluar han aparecido pronto, ya que las veces que un artículo es citado no tienen que ver directamente con la calidad intrínseca de este: puede haber muchas razones para ello. Por otra parte, es difícil comparar entre disciplinas. El hecho es que el uso sistemático de este tipo de índices ha llegado a crear una cultura de incitar a publicaciones basadas en la clasificación de cada una de las revistas. Un conjunto de organizaciones que financian la investigación firmó en San Francisco la Declaración DORA, que llama a reducir el uso de estos índices y a recuperar sistemas de evaluación cualitativa. Ha habido otras declaraciones similares y la forma de evaluar la ciencia está en un proceso de debate muy activo.

El *curriculum vitae*

Un elemento clave en la evaluación de la actividad profesional de cualquier profesional es el llamado *curriculum vitae*. Es un documento que es clave en los casos en que se solicita un puesto de trabajo, pero también, como hemos visto, en la evaluación de los proyectos de investigación. En el caso de los profesionales de la ciencia, su importancia es muy grande para conocer el alcance de su experiencia. El currículum se demanda en los procesos de selección de personal, desde las becas

predoctorales hasta cuando se solicita la consideración de investigador emérito al final de la carrera profesional, y también cuando se solicita un proyecto de investigación.

Los elementos de un currículum deben permitir a los que efectúan el proceso de evaluación tener un conocimiento más completo del candidato como profesional. Estos suelen ser la formación académica, la trayectoria profesional, incluyendo el conocimiento de idiomas, y su producción científica. En este último aspecto es donde las publicaciones realizadas juegan un papel importante. La calidad de estas y su cantidad, o al menos su continuidad, la dirección de tesis doctorales, la concesión de patentes, la participación u organización de congresos, la invitación a conferencias y cualquier detalle que permita valorar la implicación de la persona en el trabajo científico y la calidad de su producción pueden ser factores decisivos. Dependiendo del tipo de trabajo o proyecto, la actividad docente o industrial o la comunicación con el gran público pueden ser detalles de importancia. La importancia del currículum es grande y la falta de veracidad de su contenido es considerada una falta grave a la integridad de la investigación, como se discutirá en el capítulo siguiente.

Los prejuicios en la ciencia

En el *curriculum vitae* deben aparecer los méritos y logros de un profesional de la ciencia. Aunque se supone que su evaluación consiste en analizar datos y hechos de forma objetiva, la realidad es que en las evaluaciones de proyectos, y probablemente más en la contratación y promoción del personal, se filtran prejuicios de todo tipo. Es un hecho que las diferencias culturales, raciales y, sobre todo, de género actúan en estos procesos. Que esto ocurra es una demostración de que en los sistemas de evaluación se dan sesgos que perturban todo el proceso.

En el caso de los prejuicios de género, su existencia se constata con facilidad al observar el porcentaje de mujeres

que trabajan en ciencia en los diferentes niveles de responsabilidad. En las últimas décadas en los estudios científicos universitarios hay una mayoría de mujeres, quizá más en disciplinas de ciencias de la vida que en la física o las matemáticas, pero incluso en estos casos el porcentaje de mujeres está aumentando. También se puede constatar que el equilibrio de género se da en quienes trabajan para obtener una tesis doctoral y en los primeros niveles posdoctorales y de investigadores. Sin embargo, este porcentaje disminuye fuertemente en los niveles superiores de responsabilidad, en los cuales los hombres son claramente mayoría. A nivel global se ha calculado que alrededor del 30% de los investigadores son mujeres, pero los puestos más relevantes como jefe de grupo, director de centro o catedrático de universidad están ocupados solo en un 11% por mujeres y solo un 3% de ellas han obtenido algún Premio Nobel. Desde el año 2002 existe en el CSIC una Comisión de Mujeres y Ciencia, que tiene como objetivo analizar las causas de estos sesgos y proponer acciones para reducirlos.

Esto demuestra la persistencia de sesgos a la hora de evaluar el personal científico y por ello se han propuesto un conjunto de medidas que se aplican en muchas de las organizaciones que financian o desarrollan la ciencia. Por ejemplo, en los casos en los que hay una limitación de edad para obtenerla, se consideran los periodos de maternidad. También se analizan en muchos casos cómo actúan los sesgos existentes e incluso se pueden aprobar algún tipo de cuotas para tratar de eliminar estas desviaciones. En términos generales existe también otro tipo de sesgos, como los raciales, para los que en algunos países se han diseñado cuotas de empleo. Es probable que la situación esté mejorando en la mayoría de los países y en Europa en particular. Si la ciencia debe basarse en que sus profesionales tengan las mejores calificaciones para ejercer un trabajo de calidad, cualquier tipo de sesgo a la hora de la evaluación, aparte de ser una necesidad de justicia, introduce un factor que empobrece a la ciencia en su conjunto.

CAPÍTULO 6

La ciencia se desarrolla siguiendo un conjunto complejo de normas

El entorno legal de la investigación científica

Las leyes de muchos países se ocupan actualmente de muy diferentes aspectos de la investigación científica. Algunas de ellas son generales y se aplican a muchos ámbitos de la actividad social, pero tienen un impacto directo sobre la actividad de la investigación científica. Un ejemplo claro es la legislación laboral, que es de aplicación en todos los ámbitos sociales, pero que afecta a la forma en que se contrata a los profesionales de la ciencia a todos los niveles, aunque en algunos países puedan reconocerse sus especificidades. Un ejemplo de los efectos de esta legislación es cuando se presentan casos de acoso laboral en un centro de investigación, lo cual no es frecuente, pero desgraciadamente se da. En estos casos es aplicable la legislación laboral general.

En España se aprobó en 1986 la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica, que fue el primer marco general de las actividades del Estado español en ciencia y tecnología[12].

12. Esta ley fue sustituida en el año 2011 por la Ley de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, puede consultarse en https://www.boe.es/buscar/pdf/2011/BOE-A-2011-9617-consolidado.pdf

Además de esta ley general existe un conjunto de legislaciones que se han aprobado con el objetivo de fijar unas condiciones en las que se pueda llevar a cabo una investigación científica sobre sujetos determinados. El mejor ejemplo es el de la experimentación con humanos. Esta legislación procede de una reflexión que calificamos como bioética y será discutida con detalle en el capítulo 8. En la legislación de la mayoría de los países se han adoptado reglamentaciones que a menudo siguen recomendaciones internacionales que han ido perfeccionándose desde mediados del siglo XX. Uno de los mejores ejemplos es la llamada Declaración de Helsinki, que fue adoptada por primera vez por la Asociación Médica Mundial en 1964 y que se ha enmendado varias veces[13].

En ella se especifican los principios éticos que deben seguirse al realizar experimentos con humanos. Uno de los principios esenciales es el llamado consentimiento informado, según el cual la participación de los individuos en un experimento científico tiene que hacerse con su aprobación expresa y tras haberles informado de forma completa de las finalidades y riesgos de la experimentación. Este consentimiento tiene que hacerse de forma libre y con constancia escrita. Hay otros elementos en la Declaración de Helsinki que han ido refinándose según la experiencia ha ido dictando, como la definición de placebo, un tema clave en los ensayos clínicos, entre otros.

En España se aprobó en 2007 la Ley de Investigación Biomédica[14], que es un buen ejemplo del tipo de normas que regulan la investigación en una disciplina determinada y que incluye el reconocimiento de principios como los establecidos en la Declaración de Helsinki.

En el campo médico y farmacéutico son de gran importancia los ensayos clínicos, en los cuales se realizan pruebas de nuevos fármacos o nuevos tratamientos. Se trata de procedimientos muy codificados que tratan de asegurar que cualquier

13. Más información en https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki-ethical-principles-for-medical-research-involving-human-subjects
14. Puede consultarse en https://www.boe.es/eli/es/l/2007/07/03/14

fármaco que llegue al mercado se autoriza siguiendo un sistema que asegura la eficacia del tratamiento y las condiciones en las que se puede administrar. En algún momento de estos ensayos es necesario que la experimentación se haga con sujetos humanos, ya sean sanos o pacientes. Su desarrollo ha de estar seguido por comités de ética que recomiendan las condiciones en las que los ensayos pueden realizarse. En Europa se aprobó en 2001 una directiva que regula los ensayos clínicos para homogeneizar las condiciones en las que se lleva a cabo la aprobación de medicamentos que se realiza a nivel europeo[15].

Los datos obtenidos por ensayos clínicos forman la base para que un tratamiento sea aprobado. En el caso de Europa este es el cometido de la Agencia Europa del Medicamento, de la que se hablará en el capítulo 7. Existe también una regulación para el uso de muestras humanas para la investigación en la que se contemplan las condiciones de su obtención, su conservación y su uso[16]. Y, desde luego, en muchos países existe legislación que protege la privacidad de los datos personales de los individuos, en particular de los datos médicos. Esta está regulada en la Ley Orgánica de Privacidad de Datos, que en España se aprobó en 2018[17].

Además de la legislación en torno a la experimentación humana también se ha regulado de forma muy estricta el desarrollo de experimentos en los que se utilizan animales. El resultado de esta reflexión ha sido la aprobación de legislación sobre ello en muchos países y en particular de regulaciones europeas[18].

En estas regulaciones se desarrolla el llamado principio de las 3R, lo que significa que en los experimentos con animales se debe tratar de *reducir* el número de animales que se

15. En https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/files/eudralex/vol-1/dir_2001_20/dir_2001_20_en.pdf. Esta directiva fue reemplazada por una regulación sobre el mismo tema en 2014, en la que se recogía la experiencia que se había obtenido con la directiva del año 2001 y se aclaraban algunos conceptos. Véase https://ec.europa.eu/health//sites/health/files/files/eudralex/vol-1/reg_2014_536/reg_2014_536_en.pdf
16. Véase https://www.boe.es/eli/es/rdl/2014/07/04/9
17. En https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2018-16673
18. En https://ec.europa.eu/environment/chemicals/lab_animals/legislation_en.htm

utilicen, de *reemplazar* animales por otros sistemas como modelos in vitro cuando sea posible y de *refinar* los experimentos de forma que se minimice el posible sufrimiento que pueda infligirse a los animales. Las regulaciones europeas han sido traspuestas a las legislaciones de los países europeos y ello implica que los experimentos de este tipo tienen que ser aprobados por comités de experimentación animal, que deben comprobar que las condiciones contenidas en los textos legales se sigan en todos los casos.

Además de estas regulaciones existe también legislación europea para regular aquellos experimentos que requieran la liberación voluntaria de organismos genéticamente modificados y para el estudio de patógenos, humanos, animales o vegetales, que requieren condiciones de bioseguridad específicas en cada caso[19].

La bioseguridad se ha desarrollado en algunos países tratando de evitar el uso del conocimiento biológico para usos bélicos. Por ejemplo, en Estados Unidos existe una legislación sobre bioterrorismo que trata de evitar que los resultados de la investigación puedan utilizarse contra las poblaciones como amenaza. En este ámbito se aprobó en 1972 una Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, Producción y Almacenamiento de Armas Biológicas, que entró en vigor en 1975. La convención no prohíbe, sin embargo, la investigación sobre este tipo de armas.

Existen también regulaciones internacionales que tratan de responder a problemáticas globales de naturaleza científica. Un buen ejemplo de ello es la Convención para la Diversidad Biológica (CBD), que trata de proteger la riqueza biológica internacional y el transporte de especies biológicas entre países. En el marco de esta convención se aprobó una convención general en 1992 en la que se reconoce la biodiversidad como un elemento esencial en el desarrollo social; el Protocolo de Cartagena, firmado en el año 2000, y que entró

19. Esta cuestión ha sido objeto de una directiva europea del año 2001 que fue traspuesta a la legislación española en 2003. En https://www.boe.es/eli/es/l/2003/04/25/9

en vigor en 2003, que regula el transporte de organismos genéticamente modificados de un país a otro; y el Protocolo de Nagoya, que entró en vigor en 2014. Este protocolo obliga a informar a las autoridades locales cuando se trata de exportar especies animales o vegetales de un país a otro con el objeto de su experimentación y de su explotación comercial, según el principio de participación en los beneficios que se obtengan de la biodiversidad existente en un país determinado.

Los códigos de buenas prácticas

El entorno legal proporciona a los profesionales de la ciencia el marco de reglas que la sociedad ha decidido establecer para el desarrollo de su actividad. Por otra parte, la actividad científica se desenvuelve siguiendo unos criterios que han ido estableciéndose a lo largo de los años y que son la base de su credibilidad. Ya hemos ido discutiendo muchos de los aspectos que constituyen el método científico y que son los que justifican la confianza que la ciencia se merece en la sociedad. Con el aumento de la actividad científica y del personal que trabaja en ella y con la amplitud de sus funciones ha ido apareciendo también la necesidad de explicitar cuáles son las características que debe tener la investigación de la ciencia y tratar de evitar algunas de las desviaciones que han ido apareciendo. Por estas razones se han ido publicando en distintas organizaciones dedicadas a la investigación científica documentos que tratan de resumir lo que la organización considera que constituyen las buenas prácticas en el desarrollo de la investigación y que pueden ser específicas debido al tipo de organización o a la disciplina científica de que se trate. Suelen conocerse como códigos de buenas prácticas. De ello se han ocupado también oficinas públicas que tratan de investigar los casos en los que pueden observarse desviaciones de estas buenas prácticas. Probablemente la más antigua de estas oficinas es la Office for Research Integrity del Departamento de la Salud de Estados Unidos y que funciona desde 1980.

La preocupación por definir de forma explícita lo que se considera buenas prácticas en la investigación científica parte de algunos problemas que salieron a la luz pública en Estados Unidos en la década de los setenta. Esto no quiere decir que no se hayan dado casos de investigadores en los que se hayan producido actos de falta de honestidad. Son famosos, por ejemplo, los casos en los que algunos arqueólogos del pasado falsificaron piezas para publicar hallazgos sorprendentes. Sin embargo, con el auge de la investigación biomédica en Estados Unidos y sus consecuencias para la práctica médica, algunos casos tuvieron una especial relevancia y provocaron que las autoridades estadounidenses creyeran necesaria la creación de la oficina que continúa activa.

Los códigos de buenas prácticas acostumbran a definir cuáles son las características de una investigación científica que se desarrolla de forma correcta. Organizaciones como la OCDE, ESF o ALLEA se ocuparon de ello y publicaron guías orientativas para las diferentes organizaciones científicas. La mayoría de las instituciones de investigación han ido aprobando códigos que están adaptados al tipo de investigación que llevan a cabo[20].

En el año 2010 el CSIC aprobó un código de buenas prácticas donde aparecen los principios básicos en los que se basa la investigación científica, así como reflexiones sobre el profesional de la investigación científica, las publicaciones y el entorno institucional, sobre el que en el año 2020 se ha emprendido un proceso de revisión[21]. Uno de los últimos códigos europeos es el publicado por ALLEA en 2017 y ha sido adoptado como referencia por los programas de financiación de la Unión Europea[22].

En este código se describe un conjunto de cualidades que debe tener la investigación científica: la fiabilidad de sus

20. En España uno de los primeros en ser aprobados es el que actualmente rige en el Parc de Recerca Biomèdica de Barcelona, en https://www.prbb.org/system/uploads/attachment/file/3/en/CBPC_PRBB_CAT_CAST_ENG.PDF
21. En https://www.csic.es/sites/default/files/codigo_de_buenas_practicas_completo_castellano_-_ingles.pdf
22. Puede consultarse en https://allea.org/code-of-conduct/

resultados, la honradez en el trabajo, el respeto hacia las otras personas y la responsabilidad a la hora de rendir cuentas. El código se ocupa de desarrollar estas ideas en diferentes aspectos, como el entorno en el que se lleva a cabo la investigación, la formación y supervisión de los investigadores jóvenes, los procedimientos con los que se lleva a cabo el trabajo de investigación, las salvaguardas que existen respecto a los objetos de investigación, la gestión de los datos, el trabajo en colaboración, la publicación y difusión de la ciencia y la revisión, evaluación y edición de los resultados. Son todos ellos elementos básicos en el desarrollo de la investigación, como hemos ido viendo en los capítulos anteriores.

El código europeo contiene también un gran capítulo que se ocupa del incumplimiento de las buenas prácticas. Es esta en parte la razón por la que existe la preocupación por las buenas prácticas en la investigación, ya que algunos indicadores sugerirían que en los últimos años ha disminuido el respeto por las normas básicas que rigen la investigación científica en el mundo. Un dato que suele citarse es que el número de artículos científicos que son retirados de las revistas por contener algún tipo de error o manipulación ha aumentado de forma significativa durante el último decenio. En el código se describen los tres casos de malas prácticas que se dan de forma más frecuente en la actualidad y que son la invención de resultados, la manipulación de estos y el plagio. Junto a ellos se describen otros ejemplos menores de fallos, entre estos pueden citarse la manipulación de los autores o no citar correctamente autores precedentes, publicar resultados varias veces o retrasar la publicación de algún resultado, exagerar la importancia de algún resultado o faltar a la veracidad en un currículum, entre otros. Existen también los conflictos de intereses que se presentan entre las diferentes funciones de la ciencia. De estos casos se hablará con más detalle en el capítulo 7. Se trata de un conjunto de prácticas incorrectas que entorpecen el desarrollo de la ciencia, minan su credibilidad y producen un efecto muy negativo sobre los investigadores jóvenes. Finalmente, el código contiene un conjunto de recomendaciones

para la actuación en los casos en los que se presenten evidencias de malas prácticas.

Las oficinas de integridad en la investigación

Los casos de prácticas alejadas de la integridad científica son devastadores para la actividad científica. Fabricar o manipular resultados da lugar a un fraude que entorpece el desarrollo de la ciencia al confundir a los investigadores y a aquellos para los que estos resultados influyen en su concepción del mundo o para aplicaciones de tipo industrial. Existe en los últimos años una preocupación muy general por la falta de reproducibilidad de muchos resultados de la investigación biomédica que deberían ser de utilidad para la industria farmacéutica o de productos médicos. Ello puede ser debido a la falta de una información completa en la publicación o a la existencia de algún tipo de fraude. Los efectos sobre la ciencia de estas situaciones son importantes, ya que tienen como consecuencia que desaparezca la confianza a todos los niveles, que es imprescindible para que la ciencia realice su función. El plagio es, por otra parte, una práctica que menoscaba toda actividad creativa, ya sea científica o cultural. La autoría de una obra artística o científica debe ser reconocida en cualquier caso, ya que en ello está la base de los beneficios morales o económicos que su autor puede recibir. Es uno de los estímulos que tiene toda actividad creativa. Atribuirse una autoría de forma indebida socava la posibilidad de este reconocimiento.

Cuando se producen casos de malas prácticas es posible recurrir a los tribunales de justicia y en la legislación se reconocen, por ejemplo, los derechos de autoría y el plagio como delito, pero muchas de las prácticas dudosas en el ejercicio de la ciencia no son objeto de legislaciones directas en la mayoría de los países. Por ello son objeto de análisis por agencias u oficinas específicas y entre ellas ya se ha mencionado la ORI del Departamento de Salud de Estados Unidos. Su trabajo

consiste en examinar casos en los que ha habido denuncias de malas prácticas en el curso de investigaciones financiadas por el Departamento de Salud de Estados Unidos, en general a través de los proyectos del NIH (National Institutes of Health). La oficina tiene una gran experiencia en analizar los resultados publicados de estas investigaciones. En el caso de que encuentre algún tipo de malas prácticas, la oficina tiene la prerrogativa de dictar la prohibición de que el investigador principal del proyecto en el curso de cuyo desarrollo se habría producido la falta pueda solicitar nuevos proyectos al NIH durante un periodo determinado. Las autoridades americanas pueden exigir a la universidad o centro de investigación la devolución del dinero que no ha sido utilizado correctamente.

Oficinas parecidas al ORI se han ido estableciendo en muchos países. En Europa existe una red de oficinas de integridad científica llamada ENRIO. Su funcionamiento depende la legislación de cada país. En el CSIC esta función la asume el Comité de Ética, fundado en 2009 y que trata estos temas a través de su Subcomité de Conflictos. En Cataluña se creó en 2020 una Comisión para la Integridad en la Investigación, cuya finalidad es el análisis de denuncias de malas prácticas en alguna investigación. En los códigos para la integridad científica, como es el caso del de ALLEA, se describe cómo deben llevarse a cabo las investigaciones, que suelen ser muy dolorosas en la mayor parte de los casos. Si los resultados que acaban demostrándose como fraudulentos habían sido objeto de alguna publicación, la consecuencia puede ser la retractación de esta[23]. Retirar un artículo implica reconocer que en él hay material que no era apropiado para ser publicado y, vista la importancia que tienen las publicaciones científicas, es un reconocimiento de graves faltas de las buenas prácticas. Este hecho puede dar lugar a acciones disciplinarias hacia los investigadores que se reconocen como responsables de las malas prácticas según la legislación de cada país. Por esta razón, durante las investigaciones sobre las actividades sospechosas

23. Esta página recopila los casos más conocidos: https://retractionwatch.com

es esencial tratar de averiguar si se trata de errores o de manipulaciones realizadas de forma voluntaria.

Una de las cuestiones que se discuten en los casos de denuncias de fraude científico es la denuncia anónima. Por una parte, una denuncia de manipulación grave en una publicación puede provenir del interior del grupo de investigación, un miembro del cual ha podido ser testigo de estas malas prácticas. Si se trata de un investigador joven, puede temer que su denuncia le acabe acarreando prejuicios graves para su carrera. Por otra parte, la comunidad científica no es ajena a conflictos personales que pueden provocar denuncias infundadas. En general, los procedimientos de análisis de este tipo de denuncias aceptan las procedentes de los llamados "lanzadores de alerta" (*whistleblowers*). En todos los casos, pero con mayor razón cuando se trata de denuncias anónimas, se recomienda que la investigación se realice en condiciones de confidencialidad para no crear prejuicios a los afectados en el caso de denuncias infundadas[24]. Las revistas que publicaron los trabajos son informadas de ello, con el objetivo de que tomen las medidas que consideren oportunas. Ello quiere decir que las revistas científicas deben tener en cuenta los casos de presentación fraudulenta de resultados y por esta razón tienen sus propios códigos de buenas prácticas. Muchas de las revistas de mayor impacto en ciencia se adhieren a normas que han quedado explicitadas en códigos de ética en las publicaciones, como el Comité para la Ética en las Publicaciones (COPE), una asociación voluntaria de editores de revistas científicas que trata de asesorar y orientar a sus miembros sobre las buenas prácticas que deben seguir en su trabajo y cómo reaccionar en los casos en los que se presenten indicios de malas prácticas en algún trabajo ya publicado.

24. Un ejemplo actual de este tipo de denuncias lo protagoniza una página web, Pubpeer: https://pubpeer.com, en la que de forma anónima se pueden denunciar manipulaciones en publicaciones científicas.

CAPÍTULO 7

La consulta a la ciencia

La ciencia en la toma de decisiones: las agencias regulatorias

Ya hemos mencionado como una de las funciones de la ciencia la de asesorar a diferentes agentes públicos o privados en la toma de decisiones. Estas pueden ser individuales o colectivas. Un buen ejemplo es el de la previsión del tiempo. Antes de salir de casa nos interesa saber si va a hacer buen tiempo o va a llover. De forma colectiva es importante para multitud de actividades saber el tiempo que hace y el que va a hacer. Para la aviación o la navegación está muy claro, como también lo es para la agricultura y nos interesa también que se prevengan las catástrofes que puedan ser provocadas por lluvias o heladas. Por ello, tanto a nivel local como global, existen agencias de meteorología que se encargan de recoger datos que proceden de estaciones en tierra y de satélites y de elaborarlos. En España esta función la realiza la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), que permite consultar de forma continuada el estado del tiempo y la predicción en los próximos días. Actualmente el número de datos que pueden recoger los meteorólogos crece de forma exponencial y estos se utilizan como base para hacer predicciones basadas en modelos matemáticos de precisión creciente, un trabajo que corresponde a

profesionales que suelen tener una formación en la física o la geografía. Tanto los datos como los modelos necesitan de las mayores supercomputadoras existentes para sus análisis y predicciones. Para conocer el estado de los océanos, incluyendo las poblaciones de peces y mamíferos, se han creado agencias oceanográficas, como la de Estados Unidos, que agrupa los océanos y la atmósfera. Sus resultados son importantes para la prevención de huracanes, pero también a la hora de decidir sobre la gestión de la pesca en todo el mundo. Lo mismo se puede decir de las observaciones geológicas o ecológicas que consideramos esenciales para nuestras decisiones de ordenación del territorio. Para tomar todo este conjunto de decisiones es necesario disponer de los datos existentes y la elaboración que hacen de ellos expertos con conocimiento científico.

Otros ejemplos de este tipo de consultas son los que se refieren a la aprobación de los medicamentos y los tratamientos médicos y a la seguridad alimentaria, que son objeto en todo el mundo de sistemas regulatorios que son vigilados por oficinas que consultan a expertos científicos. Es bien reconocido que los medicamentos son productos importantes para la salud, pero debemos asegurarnos de que los efectos que se proclaman de su uso estén bien comprobados y de que no tengan efectos nocivos para los individuos, lo que es siempre posible cuando hay sustancias activas en el cuerpo. Por estas razones desde hace años se pusieron en marcha procedimientos para su evaluación. Algo parecido ocurre con la seguridad de los alimentos. Con la creciente urbanización, los alimentos llegan a la gente tras complejas vías de transformación y transporte que pueden alterarlos, lo que resulta importante controlar. Para ello se han creado organizaciones en la mayoría de los países del mundo que formulan reglas y sobre todo analizan los nuevos fármacos o los procedimientos de producción de alimentos y estos mismos para asegurarse que unos y otros puedan consumirse sin problemas.

Un buen ejemplo de este tipo de organizaciones es la Agencia Federal de Alimentación y Fármacos de Estados

Unidos, la FDA (Food and Drug Organization), creada a finales de la década de 1930 y cuya misión incluye el control de los fármacos y los alimentos que llegan al consumidor de su país. Se encarga de la aprobación de nuevos medicamentos y tratamientos médicos, pero también de vacunas, cosméticos o productos veterinarios y de asegurar la seguridad de los alimentos que se consumen en Estados Unidos. Es un trabajo complejo que emplea a más de 17.000 personas con formación médica y científica en muchos casos. La agencia está dividida en diferentes centros según el tipo de producto del que se ocupa. La opinión científica es en este contexto esencial para conseguir su propósito.

En Europa la situación es diferente, ya que las agencias que existen tienen objetivos separados y no toman decisiones, sino que hacen recomendaciones a los países miembros y a la Comisión Europea, que son los que toman las decisiones. Por ejemplo, la Agencia Europea de Medicamentos (EMA) aconseja a las autoridades europeas en la aprobación de nuevos fármacos y tratamiento. En la EMA la participación de los científicos se lleva a cabo en diferentes comités[25].

Sus miembros son profesionales de la ciencia con experiencia en diferentes temáticas relacionadas con la seguridad de los fármacos y que son nombrados a propuesta de los Estados miembros de la Unión Europea.

Para la seguridad alimentaria en Europa se aprobó la creación de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), que comenzó sus funciones en 2002 y cuya actividad también está basada en un número de paneles científicos que se encargan de tareas específicas relacionadas con la producción, comercialización y consumo de alimentos[26].

Todos estos paneles están compuestos de científicos con experiencia en diferencias disciplinas y su función es examinar si un producto que se desea utilizar en agricultura o en la producción de alimentos plantea algún tipo de riesgo para

25. Véase https://www.ema.europa.eu/en/committees/how-committees-work
26. Véase http://www.efsa.europa.eu/en/science/scientific-committee-and-panels

la salud del consumidor. Su misión es formular opiniones independientes que se publican de forma abierta. Estas opiniones son la base sobre la que los gestores de la Unión Europea o los Estados miembros van a tomar la decisión de autorizar que el producto entre en el mercado de alimentos europeo.

Las oficinas de asesoramiento científico

Agencias como las que hemos visto se ocupan de asesorar para la toma de decisiones en temas concretos en los que sabemos que los productos que se comercialicen pueden afectar la salud de los ciudadanos. Hay otros órganos de consulta pública a científicos que tratan de responder a cuestiones más generales que se presentan, por ejemplo, a la hora de legislar en los parlamentos o en las decisiones de los Ejecutivos. Buenos ejemplos de ello son las cuestiones relativas al modelo energético de un país, la producción y tratamiento de residuos, las relativas a la salud o el medio ambiente, o al papel de la emigración en las sociedades occidentales, hasta el punto de que una gran parte de las decisiones políticas necesitan algún tipo de referencia científica. Estas pueden hacerse de forma sistemática en el entorno de las instituciones políticas. Un ejemplo de ello fue la Oficina para el Asesoramiento Técnico, que existió entre 1972 y 1995 en Estados Unidos. En la actualidad existe una Oficina para la Política Científica y Tecnológica dirigida por un consejero científico del presidente de Estados Unidos. Los países de tradición anglosajona han utilizado el modelo de un consejero principal de ciencia con una oficina que responde a las preguntas sobre temas científicos que le formulan el primer ministro o el presidente. Así se hace en Reino Unido o Australia, por ejemplo. En Francia se constituyó en 1983 la Office Parlemantaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Techniques (Oficina Parlamentaria de Evaluación de las Opciones Científicas y Técnicas) que realiza estudios sobre las consecuencias de las acciones legislativas de la Asamblea Nacional y el Senado franceses en relación con sus contenidos científicos.

En las instituciones europeas han existido modelos distintos de consulta científica, por ejemplo, el Parlamento Europeo tiene una oficina que da soporte a un panel sobre el Futuro de la Ciencia y la Tecnología (STOA), y la Comisión Europea tiene en sus diferentes departamentos consejos específicos para debatir las cuestiones científicas. La Presidencia de la Comisión Europea optó durante un cierto tiempo por la figura del consejero principal de ciencia, pero esta se adaptó mal a las estructuras de la Comisión Europea. En 2015 se creó un Grupo de Asesores Científicos que depende de la Presidencia de la Comisión Europa y que está formado por siete científicos de diferentes disciplinas y países miembros que formulan opiniones sobre cuestiones de relevancia científica para Europa. Este grupo ha reflexionado sobre cómo se puede hacer este asesoramiento en situaciones de complejidad[27].

Este grupo ha puesto en marcha un procedimiento que consiste en solicitar a las federaciones de las academias europeas informes sobre las cuestiones de que va a tratar. En este sentido, la Asociación de Academias Europeas (ALLEA) o el Consejo Europeo de Academias de Ciencias (EASAC) tienen una amplia experiencia en la elaboración de informes sobre temas científicos de relevancia social y política. Algo parecido ocurre en Estados Unidos, donde las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina son consultadas regularmente por el Gobierno federal en temas de especial relevancia. Academias de algunos países como la Royal Society inglesa publican también de forma regular informes sobre temas científicos o de política científica[28].

La OCDE publicó en 2015 una guía en la que se formulan orientaciones sobre las condiciones en las se pueden llevar a cabo este tipo de consultas[29].

27. Véase "Scientific Advice to European Policy in a Complex World", en https://ec.europa.eu
28. Véase https://royalsociety.org/topics-policy/publications
29. Véase "Scientific Advice for Policy Making the Role and Responsibility of Expert Bodies and Individual Scientists", OECD Library, 20 de abril de 2015.

En España hay una experiencia muy limitada de instancias de consulta científica de los parlamentos. Tanto el Congreso de los Diputados como el Senado han ido consultando a personalidades o sociedades científicas en temas de contenido relacionado con la ciencia. Sin embargo, no existe una estructura con una existencia continuada en esta dirección. Existe una iniciativa ciudadana, Ciencia en el Parlamento, para proponer que se formase una estructura de este tipo, algo que los años 2020 y 2021, con la necesidad de tomar decisiones con información científica en relación con la pandemia de la COVID-19, ha demostrado su importancia y su urgencia. El Parlamento catalán creó un consejo, el CAPCIT (Consell Assessor del Parlament per la Ciència i la Tecnologia), compuesto por parlamentarios y científicos, que se ha ido aprobando en las diferentes legislaturas.

El IPCC

A nivel global es posible que el mecanismo de consulta científica más influyente que se haya creado hasta el momento sea el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Fue constituido en 1988 por el Programa sobre el Medio Ambiente de las Naciones Unidas para hacer una revisión de los datos científicos que existían sobre el cambio climático y presentarlos ante los países miembros de cara a una posible convención sobre el clima. Desde entonces han publicado cinco informes de forma periódica sobre el tema, que incluyen la metodología empleada, revisiones sobre la extensión y efectos del cambio climático, sus posibles causas y escenarios de futuro[30]. Una de las características del IPCC es que, aunque los diferentes grupos de trabajo del mismo que examinan las cuestiones relacionadas con el cambio climático están formados por científicos, las resoluciones finales proceden de estos, pero son votadas por representantes de los

30. Pueden consultarse en https://www.ipcc.ch

gobiernos, los cuales deben argumentar sus críticas. Los documentos, por tanto, pasan por un filtro de naturaleza política. La experiencia demuestra que los argumentos científicos tienen en general una fuerza suficiente como para que las conclusiones finales hayan sido crecientemente alarmantes, lo cual se aprueba con la aquiescencia de los gobiernos mundiales. El IPCC ha ido publicando informes cada vez más detallados sobre causas, efectos y escenarios de futuro relacionados con el cambio climático, que son la base para los convenios internacionales y que tratan de buscar soluciones sobre uno de los temas de mayor interés a nivel internacional.

Conflictos de intereses

Las opiniones que formulan los comités científicos de las agencias regulatorias tienen una influencia indiscutible sobre aspectos industriales concretos. Si un medicamento que ha sido investigado por una empresa farmacéutica es aprobado para su uso, las perspectivas económicas de la empresa varían de forma directa. No es extraño que el valor en Bolsa de una empresa suba o baje de forma inmediata tras la aprobación de un medicamento que la empresa produce. Por tanto, la imparcialidad de los miembros de los comités respecto a estos aspectos industriales tiene que garantizarse de forma estricta. Ha habido casos en los que esta imparcialidad se ha demostrado comprometida, por ejemplo, en la aprobación de fármacos en la que en el comité que lo aprueba figura algún científico que ha recibido fondos de la empresa que lo produce. Si este acaba produciendo algún tipo de problema de salud, la situación puede revelar algún tipo de responsabilidad individual de los científicos que contribuyeron a formular la opinión. En el año 2020 se juzgó en Francia un caso de este tipo por un medicamento, el Mediator, que produjo problemas de salud. Se acusa a los miembros de la Agencia de Seguridad de los Medicamentos francesa de haber retrasado la retirada del medicamento tras años de haber demostrado sus

efectos negativos mientras al mismo tiempo recibían algún tipo de ayuda económica de la empresa que lo producía.

Por las razones anteriores, la mayoría de las organizaciones que se ocupan de asesorar a los poderes públicos se han dotado de sistemas que permiten declarar y analizar la existencia de conflictos de intereses. Estos pueden llevar a la exclusión de miembros por la existencia de algún tipo de razón conflictiva[31]. Estos sistemas implican la declaración de estos posibles intereses y su expresión pública.

Entre los conflictos más frecuentes se encuentran los de tipo económico. Estar empleado en una empresa, participar en proyectos de investigación comunes o recibir ayudas o regalos de empresas se encuentran entre estos. Este tipo de conflictos es bien conocido y existe experiencia en las condiciones de su análisis. Existen, sin embargo, otros tipos de conflictos cuyo análisis puede ser más difícil o puede haber menos consenso en cómo pueden influir en la formación de opiniones científicas. Por ejemplo, los científicos tienen sus propios intereses personales ligados a su actividad profesional o a su promoción personal. En la práctica algunos científicos están presentes en diferentes grupos de interés que promueven la ciencia, alguna disciplina o algún aspecto que influye en su investigación. Ello puede acabar destilándose en actitudes ideológicas personales que pueden afectar la actitud del investigador a la hora de producir su opinión personal. Sin embargo, se trata de casos complejos de analizar y no suelen considerarse en los procedimientos utilizados en los órganos de asesoramiento actuales.

Por las razones anteriores podría concluirse que los comités científicos tienen un poder de decisión en temas de gran trascendencia social. De hecho, se ha hablado de un "quinto poder", que sería el constituido por los científicos, que podría acabar imponiéndose a los poderes democráticamente elegidos.

31. Un buen ejemplo de cómo se trata de desvelar estos casos y cómo se gestionan cuando se presentan es el de la Agencia Europea de Medicamentos, en https://www.ema.europa.eu/en/about-us/how-we-work/handling-competing-interests

También ocurre que en ciertas ocasiones los gobernantes se escuden en las opiniones científicas para justificar sus decisiones. Los límites de la función del asesoramiento científico deben quedar bien claros en todo momento y no deberían suplantar a las decisiones colectivas. La opinión científica es en todos los casos una parte a veces esencial en la toma de decisiones. Sin embargo, hay muchos factores de índole social que solo el colectivo social o sus representantes deben valorar en función de las necesidades de cada momento.

La ciencia en tiempos de crisis

Nuestra sociedad puede encontrarse en algún momento en situaciones de emergencia en las cuales necesita datos y orientaciones que solo la ciencia puede proporcionar. Se puede tratar de catástrofes naturales o de emergencias sanitarias o humanas. La pandemia de la COVID-19 que se presentó en 2020 es uno de los mejores ejemplos de ello, pero no el único. En estas circunstancias, el papel de la ciencia puede ser esencial, pero su gestión es compleja y el científico puede encontrarse en situaciones muy contradictorias. Existen casos que se pueden discutir, tanto de éxito en el tratamiento de situaciones de emergencia, en las que la ciencia necesaria para encontrar respuestas tiene factores de incertidumbre, como de las dificultades que se presentan en la comunicación de esta incertidumbre a aquellos que tienen que tomar decisiones y a la población en general.

El primer caso de la llamada enfermedad de las vacas locas se detectó en Reino Unido en 1986 y al año siguiente se confirmó que se trataba de una enfermedad nueva. A lo largo de los años pudo confirmarse que era una enfermedad de los bovinos que se había producido por la alimentación de bovinos a base de harinas producidas a partir de carcasas de vacas y ovejas. En el periodo máximo de la crisis se diagnosticaron más de 1.000 bovinos infectados a la semana. Se descubrió que el agente que produce la enfermedad se trata de un prión,

que es una forma de una proteína que se modifica y produce la enfermedad, un mecanismo muy poco conocido y que se había descrito en enfermedades de tribus de caníbales en Nueva Guinea. A partir de 1995 se descubrió que la enfermedad podía pasar a los humanos y que esta se producía después de haber ingerido carne de animales enfermos. Algunos modelos hacían predicciones de hasta 100.000 posibles afectados, aunque acabó produciendo alrededor de 200 muertes sobre todo en Reino Unido. Este caso produjo una gran alarma en toda Europa y se formaron comités de análisis. En Europa se encargó de ello el Comité Científico Director de la Comisión Europea, que trabajó en condiciones de gran incertidumbre sobre las causas y los periodos de incubación de la enfermedad, pero acertó en basar su opinión en que el agente infectivo se hallaba en el tejido nervioso de los animales. La prohibición del consumo de harinas animales en las vacas y de derivados del sistema nervioso bovino en humanos detuvo la enfermedad.

DE TERREMOTOS A PEPINOS

A principios del año 2009 se produjeron en la ciudad italiana de L'Aquila una serie de terremotos de pequeña intensidad, pero que fueron señalados por un técnico del Instituto Nacional de Astrofísica como señales de un gran terremoto. El Gobierno italiano nombró una comisión para el seguimiento de las sacudidas y para informar al público. Estaba formada por científicos y gestores que hicieron público el 31 de marzo un informe según el cual los terremotos son impredecibles, la región de L'Aquila es zona de riego sísmico y que a corto plazo un gran terremoto era poco probable. El 9 de abril se produjo una fuerte sacudida que causó 309 muertos. Algunos de los parientes de las víctimas acusaron a la comisión de homicidio, con el argumento de que algunos se quedaron en casa tras el informe de la comisión. En primera instancia los jueces sentenciaron a los miembros de la comisión por homicidio involuntario en el año 2012, aunque dos años después fueron declarados inocentes tras su apelación. Este caso es un buen ejemplo de la dificultad de transmitir una

información sobre una catástrofe cuando la información es incompleta, pero puede ser importante para que los ciudadanos tomen sus decisiones. También abre la cuestión de cuál es la responsabilidad legal de aquellos que formulan opiniones en una comisión de este tipo.

Otro caso que muestra la dificultad de transmitir a la población una información que se considera importante en situación de urgencia fue el brote de infecciones alimentarias producidas por una cepa de la bacteria *Escherichia coli* en 2011 en Alemania. Se trató de un caso de cierta gravedad que afectó a casi 3.000 personas y causó unas 50 muertes. Un estudio epidemiológico señaló inicialmente al consumo de una serie de vegetales, entre los cuales se encontraron partidas de pepinos ecológicos del sur de España, en los que se detectó la presencia de estas bacterias. Sin embargo, hay muchas variantes de ellas que no presentan ningún peligro y, antes de comprobar que se trataban las mismas que infectaban a los pacientes, se detuvieron las importaciones de pepinos españoles, lo que causó pérdidas cifradas en centenares de millones de euros. Los análisis más precisos demostraron que los pepinos no contenían la cepa causante de la enfermedad, que se encontró en brotes de soja ecológicos crecidos en Alemania. La hipótesis de su origen se acabó proponiendo en semillas de fenogreco procedentes de Egipto. También este caso da un buen ejemplo de la dificultad de comunicar resultados parciales en condiciones de incertidumbre cuando los responsables debaten entre la urgencia de un caso que afecta a la salud de los ciudadanos y el disponer de resultados rigurosos para poder dar la información con la precisión necesaria.

Probablemente, el mejor ejemplo de la toma de decisiones con base científica en situación de gran desconocimiento lo ha producido en el año 2020 la pandemia de la COVID-19. Tras meses de sufrir la peor enfermedad infecciosa de los últimos tiempos a nivel global, se han tenido que tomar decisiones mientras se seguía discutiendo el mecanismo que permitió su extensión probable de murciélagos a humanos. Tampoco eran conocidos detalles del proceso de infección, cuáles son sus efectos, que parecen ser muy diferentes entre los diferentes individuos, y los esfuerzos mundiales por encontrar

tratamientos o vacunas han movilizado a una gran cantidad de científicos en todo el mundo. La población se ha dirigido a la comunidad científica para encontrar orientaciones que han permitido formular reglas para evitar contagios mediante el mantenimiento de distancias entre individuos y una higiene continuada. Quienes han tenido que tomar decisiones se han encontrado con la dificultad de disponer de una opinión científica parcial que necesita tiempo y deliberación para llegar a conclusiones fiables.

CAPÍTULO 8

La comunicación de la ciencia en un mundo digital

La comunicación de la ciencia

Hacer públicos los resultados de la ciencia es una etapa esencial para la existencia misma de la investigación realizada. Esto es lo que se produce a través de las publicaciones científicas. Pero este tipo de comunicación de los resultados no es el único. Ya hemos visto que la protección de la propiedad intelectual a través de las patentes implica una explicación detallada de estos resultados. Y también una explicación clara a la sociedad es necesaria si se quieren utilizar los resultados de la ciencia, ya sea para su utilización industrial o para la toma de decisiones sociales o individuales. Ello implica que informar de los resultados científicos fuera del estricto ámbito profesional es también una necesidad que puede explicarse por varias razones. Una de ellas es porque, si los resultados de la ciencia nos informan sobre aspectos del mundo en que vivimos que pueden tener importancia para nuestra visión del mundo, la población en general ha de tener derecho a conocerlo. En algunos momentos se ha proclamado el derecho al conocimiento científico y, si es así, hay que buscar vías para ejercerlo. Otra razón es que, como ya hemos visto anteriormente, los resultados de la ciencia pueden interesar a aquellos que se esfuerzan por hacer llegar a los ciudadanos productos

o servicios que consideren interesantes para su propia vida y que se haga en las condiciones que estos decidan. La economía de una sociedad puede depender de ello. Por tanto, que los resultados de la ciencia trasciendan el ámbito profesional de la ciencia es una necesidad en nuestras sociedades modernas.

Sin embargo, la experiencia demuestra que esta comunicación social de la ciencia puede no ser fácil. Una de las razones de ello es la diferencia en el lenguaje que se emplea. La ciencia en su desarrollo necesita de un lenguaje, a menudo con base matemática, del que no puede apartarse si no quiere perder el rigor que le es exigible. Pero este lenguaje no es accesible al ciudadano sin un entrenamiento a menudo complejo. Por tanto, se ha desarrollado la divulgación o vulgarización de la ciencia, que tiene el objetivo de trasladar los datos y las ideas de la ciencia al ciudadano en una forma que sea comprensible para él. Es una forma de comunicación que requiere traducir el lenguaje de la ciencia al lenguaje cotidiano del ciudadano, lo que puede implicar un esfuerzo considerable. Este es un esfuerzo que suelen hacer ya sea profesionales del periodismo, que deben indagar aquellos aspectos de un resultado de la ciencia que pueden trasladarse al ciudadano sin formación específica, o profesionales de la ciencia, que deben reconvertir su forma de comunicar de forma que sea atractiva, comprensible e informativa para el ciudadano. De ambos casos tenemos buenos ejemplos en nuestra sociedad. Para los profesionales del periodismo puede ser difícil encontrar la fuente de información más fiable sobre una cuestión científica o simplemente orientarse entre las informaciones que se publican. Para proporcionar esta información existen oficinas de comunicación en universidades y centros de investigación. Se han creado también, sobre todo en los países anglosajones, oficinas independientes como el Science Media Center de Reino Unido, que tratan de ser una fuente de confianza de información científica para comunicadores. En España existe desde 2008 el Servicio de Información de Noticias Científicas (SINC), una agencia que proporciona noticias con contenido científico a los medios de comunicación.

La divulgación científica plantea conflictos a diferentes niveles. Algunos de ellos son los que proceden de su misma naturaleza, es decir, de cómo pueden expresarse ideas que en su misma generación requieren un lenguaje distinto del que normalmente utilizan aquellos a los que va destinado. Otros proceden de intereses que pueden estimular la misma actividad de comunicación. La divulgación de un resultado de la ciencia puede interesar a aquellos individuos u organizaciones que lo han producido para demostrar su prioridad o la calidad de su actividad. O puede interesar a empresas cuyo mercado depende del interés o la aceptación que los consumidores demuestren hacia su producto. También puede estar dirigido por intereses políticos o ideológicos. Todo ello implica una situación no muy distinta de la que se encuentra el periodismo cotidianamente y que regulan sus normas deontológicas. La calidad de la comunicación científica, como ya se ha comentado en un capítulo anterior, se demuestra sobre todo en situaciones de crisis en las que disponer de la mejor información científica puede ser vital para la sociedad en general.

La publicación científica en un mundo digital

Todo el espectro de las publicaciones científicas ha sido sacudido fuertemente por la irrupción de los medios digitales de publicación y comunicación. Es así en la comunicación de los resultados de la ciencia hacia el público en general. En las redes sociales son muy activos algunos científicos y también los gabinetes de comunicación de universidades y centros de investigación. En la plataforma YouTube encontramos divulgadores de la ciencia, en general jóvenes, que tienes centenares de miles o incluso millones de seguidores, algo impensable para divulgadores de la ciencia que, con suerte, venden algunos millares de libros. Mediante estos nuevos canales los conceptos científicos o las novedades de la investigación están al alcance de cualquiera. Como en la mayoría de estos casos, no existen filtros que evalúen la calidad de la información

transmitida, lo cual implica que, junto con los canales de divulgación que realizan un esfuerzo de rigor, existen otros en los que, en forma de divulgación científica, pueden publicar noticias falsas o transmitir conceptos de dudosa calidad científica o claramente falsedades.

La irrupción de los sistemas digitales de comunicación ha representado también una revolución completa en las publicaciones científicas. En la actualidad, la práctica totalidad de las revistas científicas es accesible por la red. Un efecto inmediato de este hecho ha sido la transformación o incluso desaparición de las bibliotecas en los centros de investigación. No hace tanto tiempo, las bibliotecas recibían las revistas científicas en formato impreso y eran, de hecho, el centro de la vida científica de los centros. Con la presencia de las revistas en las redes, los investigadores tienen acceso a ellas desde sus propios ordenadores, lo que sin duda facilita su consulta. Este hecho ha tenido efectos pronunciados en el universo de las revistas científicas. Por una parte, las revistas científicas han tenido que ir abriendo sus propias versiones en la red, lo cual es una adaptación tecnológica importante. Ello va desde la recepción de manuscritos, su revisión, los mecanismos de aceptación y luego su producción. Con ello se dan nuevas posibilidades para presentar los resultados de forma gráfica o de una gran masa de datos en forma de suplementos accesibles. En este periodo han ido apareciendo revistas que se publican exclusivamente en la red sin versión en papel. Un ejemplo de ello son las revistas de la editorial PLOS (Public Library of Open Science), que es una organización sin ánimo de lucro que se creó a partir de una propuesta de grupos de científicos en el año 2000. La mayor de estas revistas, *PLOS One*, ha publicado más de 200.000 artículos, con un máximo de 31.500 en 2013, año en el que el número de artículos descendió por la competencia de otras revistas de formato abierto. Para los investigadores y para cualquier interesado la gran ventaja de este tipo de revistas es que se puede acceder de forma libre a sus contenidos sin depender de que la propia institución pague la suscripción.

Durante este tiempo de transformación se han producido tensiones alrededor de las publicaciones científicas que tienen una base directa o indirectamente económica. Ya hemos dicho que se trata de una industria de un volumen económico considerable y en la que participan desde grandes grupos editoriales hasta pequeñas sociedades científicas. Las revistas de papel se financiaban esencialmente por suscripciones pagadas por las bibliotecas. Las revistas puramente electrónicas, en cambio, se financian por cargos que se hacen a los autores, lo cual puede ser un coste no despreciable para un grupo de investigación. Existen también revistas híbridas que se publican al mismo tiempo en papel y en la red, y que pueden ofrecer a los autores la posibilidad de que su trabajo aparezca con un acceso libre a todos los interesados. En este caso, el coste lo pagan los autores; en el otro, el acceso es restringido, por ejemplo, a los investigadores de organizaciones que pagan la suscripción. Existen financiadores de la investigación que exigen que los trabajos que resultan de los proyectos financiados sean de acceso libre para que toda persona interesada pueda tener conocimiento de ellos.

El debate sobre quiénes tienen que pagar por las publicaciones científicas se dirige hacia una situación compleja. El sistema de pago por publicar tiene consecuencias de diferentes tipos. Una de ellas es que algunas revistas están publicadas por sociedades científicas cuyas actividades han estado dependiendo de las suscripciones de las revistas que publicaban y el nuevo sistema restringe esta vía de financiación. Otro debate lo plantean las organizaciones de investigación y las universidades, que pueden estar pagando al mismo tiempo las suscripciones de las bibliotecas y a sus investigadores los costes de publicación. Ello ha llevado a estas organizaciones a complejas negociaciones con las editoriales de las revistas. Una consecuencia indeseable de este proceso ha sido la aparición de revistas electrónicas que simplifican los sistemas de revisión de los manuscritos y que llegan a publicar prácticamente cualquier artículo si los autores están dispuestos a pagar una tarifa. Se han publicado listas de revistas, denominadas revistas

depredadoras, que llevan a cabo este tipo de actividades, con el objeto de alertar de estas prácticas que degradan el valor de los artículos publicados en ellas. También está ocurriendo que alguna revista de publicación exclusivamente electrónica ha cerrado sus servicios y los autores se han encontrado con que sus artículos han desaparecido de la red.

Otra propuesta que ha facilitado la presencia de publicaciones en la red es el desarrollo de archivos en los cuales pueden depositarse manuscritos antes de su publicación. En disciplinas como la física teórica existía desde hace tiempo una tradición de *preprints*, manuscritos con resultados científicos que se distribuyen para el comentario entre colegas antes de su publicación. La distribución de estos resultados por vía digital está en el origen de la World Wide Web en el entorno del CERN. La transformación de los *preprints* en papel en un formato digital se ha convertido ahora en archivos abiertos en la red entre los que destaca arXiv para la física y ciencias relacionadas. Esta publicación digital abierta recibió en el año 2019 más de 155.000 manuscritos y registró 260 millones de archivos bajados por la red. Es una iniciativa sin ánimo de lucro, con un coste de unos dos millones de dólares, gestionada por la Universidad de Cornell, en la que participan organizaciones y fundaciones de todo el mundo. En la misma línea se fundó BioArxiv en 2013, un archivo de manuscritos no revisados de las ciencias de la vida que está gestionado por el Cold Spring Harbor Laboratory de Nueva York. A finales de 2019 recibía unos 3.000 artículos al mes. Estos archivos ofrecen también la posibilidad de que cualquier interesado pueda hacer comentarios sobre el artículo que se presenta. Esta forma podría de alguna forma sustituir la falta de revisores, que es un problema importante en muchas revistas. Los investigadores están solicitados con gran frecuencia para actuar de revisores de artículos o proyectos y esto puede convertirse en un trabajo que algunos evitan. Para ello se han creado estímulos, como los que ofrece una iniciativa denominada Publons, que ofrece una forma de reconocimiento de los revisores o un sistema

abierto de revisión, como el denominado Review Commons, que ofrece a los investigadores revisiones de sus artículos antes de mandarlos para su publicación.

También en la red se pueden realizar consultas sobre publicaciones científicas con sistemas de búsqueda por temas o por autores. Un buen ejemplo es Pubmed, gestionado por el Departamento de Salud de Estados Unidos, o privados como Google Scholar, Scopus o Web of Science. Todos ellos son recursos que permiten buscar publicaciones científicas en la red, así como cuántas citas han recibido los artículos o cálculos sobre su impacto.

El almacenamiento de datos

Los resultados de los artículos de las publicaciones digitales se presentan, obviamente, en formatos que son también digitales. Este hecho responde también a que la práctica totalidad de los datos que se obtienen en la investigación científica se producen o se conservan en forma digital. Su volumen ha crecido exponencialmente en todas las disciplinas de la ciencia. Esto es algo cierto, por ejemplo, en la investigación en física de partículas. El CERN, el mayor centro mundial en investigación en esta área, produce un petabyte de datos por día y almacena 100 petabytes en sus ordenadores. Los grandes observatorios astronómicos llevan a cabo sus observaciones mediante detectores que dan lugar a imágenes digitales que producen decenas de gigabytes al día para cada uno de ellos. Las imágenes de satélite o los datos meteorológicos necesitan las mayores supercomputadoras para su almacenamiento y su análisis.

En biología molecular los datos de la secuenciación de ADN o de estructuras cristalográficas de proteínas se almacenan en bases de datos que son gestionadas por servidores públicos como el Instituto Europeo de Bioinformática (EMBL-EBI) o el Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI) de Estados Unidos, en los cuales se

almacenan los datos de secuencias de ADN de forma abierta. La última edición del GenBank del NCBI este contenía casi nueve billones de pares de bases de ADN de 2.000 millones de registros. La base datos del EBI almacena 273 petabytes y recibe 65.000 peticiones diarias de información. Por tanto, el conjunto de datos científicos requiere un almacenamiento de enorme volumen que debe ser conservado en una forma adecuada y ser accesible. Es en conjunto un esfuerzo considerable por parte de las organizaciones internacionales.

La mayoría de las publicaciones científicas exigen que los datos en los que se basan las investigaciones publicadas sean accesibles. Se trata de un requerimiento esencial si las publicaciones deben poder ser reproducidas y utilizadas para trabajos posteriores. Las bases de datos internacionales son un buen ejemplo de esta tendencia. Existen, sin embargo, dominios de la ciencia en los que no hay centros de almacenamiento de datos como los anteriores. Por tanto, las organizaciones de investigación como las universidades proporcionan a sus investigadores espacio de ordenador para depositar sus resultados, como es exigible en las actuales circunstancias de las publicaciones científicas. Se ha diseñado un concepto que es el de los datos FAIR al que deben responder los datos almacenados. Proceden de las siglas de *findability*, lo que significa que los datos deben poder ser encontrados; *accesibility*, que quiere decir que se debe poder acceder a ellos sin barreras; *interoperability*, que indica que pueden ser fácilmente integrados con otros datos; y *reusability*, es decir, que los datos han de estar bien descritos para que cualquier investigador pueda saber qué datos está usando. Muchas de las agencias que financian la ciencia actualmente requieren que los datos que se producen en los proyectos que financian sigan las condiciones descritas en los principios FAIR. Ello no es siempre fácil, ya que requiere un esfuerzo de trabajo y económico significativo. Es, sin embargo, una tendencia a la que se dirige la ciencia actualmente.

Una ciencia abierta

Las tecnologías digitales con sus posibilidades de comunicación, almacenamiento y análisis de datos están alterando muchos aspectos de cómo se hace y se comunica la ciencia. Están transformando profundamente la forma en que se publican los resultados científicos y la industria editorial en la que se basan las revistas que, como hemos dicho, es una industria potente. Para algunos, hay que llegar a sistemas en los que los resultados científicos sean accesibles a cualquier persona interesada sin que existan barreras económicas como las que representan las suscripciones, la forma tradicional de financiar estas publicaciones. El acceso abierto a las publicaciones científicas se ha convertido en una exigencia para muchos de los financiadores de las investigaciones que quieren que cualquiera que lo desee pueda aprovecharse de los resultados de estas. Igualmente, el almacenamiento abierto de resultados e investigaciones en una forma previa a la elaboración final es una tendencia en la gran mayoría de las disciplinas. Esta apertura favorece la transparencia de los resultados y los hace accesibles a quien desee utilizarlos y elaborarlos con posterioridad. La ciencia abierta es uno de los paradigmas que se proclaman para el futuro de la investigación científica.

Como ocurre frecuentemente, este deseo tiene limitaciones evidentes. Una de ellas es que justamente algunos de los que financian la investigación no desean que los resultados sean abiertos. Es el caso de la financiación de investigaciones por parte de empresas privadas. Es posible que una vez que un resultado está protegido por una patente, por ejemplo, se abran al público los resultados. Sin embargo, la inversión privada a menudo desea conservar la propiedad y el acceso prioritario a los resultados de la ciencia. En segundo lugar, debemos preguntarnos quién paga el conjunto de un sistema de ciencia abierto que representa un gasto considerable. Si las revistas no se pagan con suscripciones, las editoriales reclaman el pago a los autores y ello puede ser muy costoso. Los depósitos de datos se financian por ahora gracias a fundaciones o mediante

proyectos, pero son también costosos. Los grandes ordenadores necesarios para el almacenamiento y tratamiento de datos están disponibles y existen sistemas de acceso a los datos muy eficientes. Sin embargo, alguien se debe ocupar del mantenimiento de estos sistemas y el gasto energético de algunas grandes supercomputadoras se calcula en megavatios, y esta energía debe producirse, lo que conlleva el correspondiente impacto en el medio ambiente. Es probable que se deba decidir qué datos vale la pena conservar y cuáles no es necesario hacerlo. Por ello, la calidad y el interés de aquello que se almacena ponen también un límite a un acceso completo a cualquier tipo de datos. Sin embargo, la tendencia hacia una ciencia abierta va a persistir en los tiempos próximos apoyándose en el desarrollo de las tecnologías digitales. Con ello debería ser posible un mejor análisis de los datos disponibles en cualquier lugar y un acceso más fácil a los resultados de las investigaciones.

CAPÍTULO 9

Ciencia y ética

La ciencia en la formación de la visión del mundo

La ciencia en su historia ha producido resultados o ideas que han entrado en conflicto con intereses establecidos o con planteamientos que eran dominantes en la sociedad hasta aquel momento. Existen dos ejemplos bien conocidos de ello. Cuando en el Renacimiento se emprendieron nuevos estudios sobre el movimiento de los planetas, Nicolás Copérnico descubrió en el siglo XVI que el movimiento de los planetas por el firmamento se explicaba de forma más fácil si se suponía que el Sol se hallaba en el centro del sistema solar que si el centro lo atribuíamos a la Tierra. Podría considerarse un simple cambio de perspectiva que siglos atrás también había propuesto Aristarco de Samos; sin embargo, se trataba de una idea que atentaba a la visión del mundo dominada por la Iglesia del momento que en su visión del mundo colocaba al ser humano en el centro del universo. Por esta razón, la Iglesia católica se opuso a la concepción copernicana del sistema solar. Quizá el episodio más agudo de este conflicto lo debió de vivir unos de los fundadores de la ciencia moderna, Galileo Galilei, que había comprendido la ventaja del modelo copernicano para la explicación del movimiento de los planetas; además, durante este episodio Galileo fue forzado a retractarse

formalmente de estas ideas. A pesar de ello las ideas de Copérnico acabaron imponiéndose.

Algo parecido le ocurrió a George Darwin y su propuesta sobre el origen de las especies formulada en su libro homónimo de 1859. Se trata también de un cambio radical de perspectiva en la explicación de la existencia de la diversidad de las especies vivas en nuestro planeta, lo que incluye la especie humana. Darwin propone una hipótesis de la existencia de las diferentes especies de animales y plantas en términos de evolución y de selección de las más adaptadas en cada periodo. Se trata de una visión que contrasta también con una idea patrocinada por las iglesias del momento, en particular la Iglesia católica, que defendían la propuesta de una creación divina prácticamente simultánea de las especies. Las ideas de Darwin fueron también rechazadas por otros estamentos religiosos y se prohibió la publicación de sus trabajos y la enseñanza de sus ideas, aunque estas prohibiciones no tuvieron un efecto a largo plazo ya que la selección natural como base del origen de las especies es una de las ideas centrales de la ciencia actual. Sin embargo, el creacionismo sigue vivo en entornos religiosos y se presenta como una explicación alternativa a la variedad de especies biológicas.

No siempre fueron las organizaciones religiosas las que se opusieron a nuevas ideas formuladas por la ciencia. A mediados del siglo XX en la Unión Soviética se vivió un dramático episodio de confrontación entre las ideas de la genética y las que se proponían desde los estamentos oficiales del Partido Comunista dominante. Una figura destacada de la ciencia del momento, entre 1940 y 1950, fue Nikolái Vavílov, muy activo en la introducción de la genética en Rusia y su aplicación a la mejora de variedades de plantas cultivadas. Para ello fue un gran propulsor de la conservación de semillas de diversas especies que recogió en diferentes viajes alrededor del mundo. Sin embargo, el director del Instituto de Genética de la Unión Soviética Trofim Lysenko se oponía a las ideas de la genética siguiendo la idea de que las especies se adaptaban a los entornos climáticos y geológicos. Josef Stalin favoreció a Lysenko al

considerar que la genética era una ciencia burguesa, excluyendo a Vavílov de sus funciones. Este murió de inanición en una estación de tren en su traslado a un campo de concentración.

Fue necesario que se produjeran cosechas catastróficas de cereales y la desaparición de Stalin para que en los años sesenta las ideas de Lysenko fueran desechadas. La figura de Vavílov ha sido reivindicada como la de un pionero en la noción de que la variabilidad genética es la base de la mejora de plantas. En los mismos años, otros gobiernos totalitarios dieron cobertura a pretendidas investigaciones científicas cuyas consecuencias han tenido efectos profundos en la forma de llevar a cabo la práctica científica en diversos dominios.

La bioética

Uno de los periodos más terribles de la historia moderna fue cuando el Partido Nacionalsocialista gobernaba en Alemania, entre 1933 y 1945, que terminó tras la Segunda Guerra Mundial con los Juicios de Núremberg. Uno de los tribunales tuvo como cometido juzgar a un grupo de médicos que habían realizado experimentos con prisioneros de los campos de concentración. De ellos, 16 fueron condenados por crímenes contra la humanidad. Como consecuencia del juicio, el tribunal concluyó que existían unas condiciones en las cuales se podían hacer experimentos con humanos[32].

Se puede considerar esta sentencia como el inicio del establecimiento de las reglas de ética en la investigación ligadas a experimentos médicos. Un informe posterior estadounidense de 1977, el *Belmont Report*[33], respondía en parte a estudios en los que se habían realizado experimentos entre enfermos de sífilis de las poblaciones americanas de origen africano y otros anteriores realizados en Guatemala. El informe

32. En https://web.archive.org/web/20100602064823/http://www.pcb.ub.es/bioeticaidret/archivos/norm/CodigoNuremberg.pdf
33. Véase https://www.hhs.gov/ohrp/regulations-and-policy/belmont-report/index.html

especificaba de forma detallada los principios de la experimentación con humanos.

Finalmente, la Declaración de Helsinki se convirtió en la referencia que se utiliza para este tipo de reglas en experimentación humana. En todas estas reflexiones se aceptaron unos principios como el de beneficencia y no maleficencia, que implica que la investigación tiene que buscar el bien de los individuos o al menos no hacerles daño, o los de justicia y equidad o de respeto a la intimidad y confidencialidad de los datos, entre otros, que dan lugar a prácticas como el consentimiento informado. Todo ello impacta sobre las prácticas de la investigación en humanos, pero van más allá de estas disciplinas.

Durante este tiempo la investigación biológica dio lugar a nuevas posibilidades que requerían una reflexión sobre su uso. La llegada de los anticonceptivos a finales de la década de los cincuenta representó una revolución de gran calado en las relaciones de las parejas respecto a la decisión de tener descendencia y proporcionó a las mujeres una herramienta esencial que ha tenido implicaciones sociales cuya importancia se demuestra en las reacciones que produjeron. Otro ejemplo es el de la fecundación in vitro que en 1978 se demostró posible con el nacimiento de una niña, Louise Brown, en Reino Unido. El trabajo había sido realizado, entre otros, por Robert Edwards, a quien se atribuyó el ganador del Premio Nobel de Medicina de 2010. Esta nueva posibilidad abrió un debate en diferentes países y se encontró con la oposición de la Iglesia católica. Como en Francia en 1983 que dio lugar a la creación del CCNE (Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et la santé) y que desde entonces ha aprobado más de 130 opiniones. Su reflexión ha sido importante en la redacción de leyes sucesivas en Francia sobre bioética, la última aprobada en 2020. En Reino Unido, la Fundación Nuffield creó en 1991 el Nuffield Council on Bioethics, que desde 1994 está financiado también por el Medical Research Council y la Fundación Wellcome. Es un consejo independiente que ha ido publicando informes y

declaraciones sobre los temas de interés sobre implicaciones éticas de las nuevas tecnologías en ese país.

Prácticamente todos los países han creado algún tipo de órgano de discusión sobre bioética, lo que responde a la sensibilidad de estos temas que necesitan una reflexión que se ajuste a la visión cultural del mundo en cada sociedad. En algunos países esta reflexión se ha ampliado a otras más allá de la biología y sus aplicaciones. Un buen ejemplo de ello es el Consejo de Ética de Alemania, que depende del Gobierno Federal. Fue fundado en su forma actual en 2007 y está compuesto por 26 miembros de diversas disciplinas científicas, filosóficas y jurídicas. Ha publicado opiniones sobre temas de bioética y de nuevas tecnologías. En España y Cataluña existen sendos comités de bioética y en Cataluña, que dependen de sus respectivas consejerías o ministerios de Sanidad.

A nivel europeo, el Consejo de Europa se ha ocupado de la bioética desde la perspectiva de los derechos humanos[34]. Una de sus actividades ha sido promover convenciones entre los Estados miembros del Consejo para proteger los derechos humanos en relación con las nuevas tecnologías médicas. Un buen ejemplo ha sido la Convención de Oviedo[35], que trata de las modificaciones genéticas, la clonación, los bancos de tejidos y otros temas que han ido apareciendo en los últimos años. También a nivel internacional la Unesco constituyó un consejo de bioética[36] cuya función es coordinar la reflexión sobre estos temas a nivel global.

Las nuevas biotecnologías basadas en las metodologías del ADN centran muchos de los debates sobre bioética. No obstante, las tecnologías basadas en el conocimiento del desarrollo de las células desde el inicio de la fecundación hasta la formación de un organismo adulto han centrado muchos de estos debates, como es el caso de la fecundación in vitro, aunque ha habido otros desarrollos de la biología celular también muy discutidos como aquellos procesos que dan lugar a los

34. Puede consultarse https://www.coe.int/en/web/bioethics/home
35. Véase https://www.coe.int/en/web/bioethics/oviedo-convention
36. Más información en https://en.unesco.org/partnerships/partnering/bioethics

diferentes tejidos del cuerpo a partir de las células del embrión o de las células madre, que son aquellas de las que parten las que forman los distintos órganos. Por ejemplo, ha sido posible conseguir que células del cuerpo puedan transformarse en células diferentes mediante tratamientos in vitro, o que un individuo de una especie de mamífero tuviera un genoma idéntico al de un individuo adulto de su misma especie. El primer caso, el de la oveja Dolly, llamó mucho la atención pública en 1996.

Todo este desarrollo ha abierto la posibilidad a la medicina regenerativa, cuyos objetivos es que sería interesante conseguir células que repararan aquellas que se han dañado en un individuo adulto, por ejemplo por un infarto en el corazón o a causa de la artrosis, o bien células que produzcan insulina. Una de las mejores fuentes de células madre son los embriones, lo que ha abierto debates complejos sobre el uso que se pueda dar a los embriones humanos que no se utilizan en los procesos de fecundación in vitro. La posibilidad de conseguir células genéticamente idénticas a las de un individuo o incluso la clonación de individuos genéticamente idénticos a un adulto, como fue el caso de Dolly, ha abierto también debates en los que han influido las tradiciones de pensamiento de las diferentes sociedades. Todos estos esfuerzos son el testimonio de la importancia que las sociedades a nivel global han demostrado por el uso correcto de las nuevas tecnologías de la biología tanto a nivel celular como a nivel molecular.

La historia nos enseña que algunos resultados de la ciencia han influido de forma profunda en las sociedades modernas tanto en su manera de pensar como en su comportamiento. No es de extrañar que se produzcan reacciones adversas y que a menudo se deban tomar decisiones en relación al uso de las nuevas posibilidades que la ciencia y la tecnología ofrecen. Hay por tanto una necesidad de que los responsables políticos y los individuos posean una buena información del significado de los descubrimientos que se va obteniendo en biología y los profesionales de la ciencia tienen un papel

imprescindible en ello. La actitud de la sociedad respecto a las nuevas biotecnologías acaba teniendo también sus efectos sobre el marco en el que se desarrolla la investigación científica. La implicación del científico en estos debates es por tanto esencial tanto para aportar en el conocimiento preciso de las materias que se discuten como para incorporar en su trabajo las inquietudes que la sociedad manifiesta.

La modificación de los genomas

La segunda mitad del siglo XX ha sido testigo del desarrollo espectacular de metodologías basadas en el conocimiento de la información inscrita en el ADN. Pero también se han desarrollado otras que permiten modificar el ADN de prácticamente cualquier organismo vivo. Podemos considerar su inicio en la década de los años setenta en la que se desarrollaron las llamadas tecnologías del ADN recombinante. Se trataba de aprovechar el conocimiento sobre todo de los mecanismos moleculares de la biología microbiana para romper y unir entre ellos fragmentos de ADN y amplificarlos a voluntad en bacterias. Esta amplificación permite el conocimiento de la información que contienen los fragmentos y sintetizar también los productos codificados en ellos, en general proteínas. Estas metodologías permitieron un salto cualitativo en los métodos disponibles en biología molecular y tuvieron consecuencias importantes en al menos dos direcciones.

Una de ellas es que abren vías a la producción de proteínas de interés comercial. Las tecnologías del ADN recombinante fueron desarrolladas y patentadas por las universidades californianas y algunos de sus descubridores crearon compañías para su aplicación. Se produjeron mediante estas tecnologías y se comercializaron proteínas de interés terapéutico como la insulina o la hormona de crecimiento, entre otras. La otra consecuencia fue el debate sobre la legitimidad de su uso. En el año 1975 se convocó una reunión de científicos interesados en el tema en el centro de conferencias de Asilomar al

sur de San Francisco en la que se planteó si las nuevas tecnologías planteaban un riesgo que no serían capaz de controlar. La conclusión mayoritaria fue que sería necesario proponer una moratoria en el uso de estas técnicas. En algunos lugares se llegó incluso a plantear su prohibición. Sin embargo, pronto se demostró que con un mínimo de precauciones no había motivo para ninguna alarma en términos de seguridad. En cualquier caso, se había puesto en marcha el debate sobre el derecho a utilizar una tecnología nueva de la que no había certeza de las consecuencias de su uso.

En los años ochenta se demostró que las tecnologías de ADN podían permitir no solo el análisis de la información contenida en este sino también su modificación. La producción de los primeros animales transgénicos fue publicada el año 1981 y en el caso de las plantas en el año 1983. Esto significa el desarrollo de métodos que permiten introducir fragmentos de ADN en el genoma de un organismo. Si este fragmento contiene un gen, el animal o la planta pueden adquirir una nueva función. Las técnicas que se desarrollaron permitieron estudiar los efectos de estas nuevas funciones y han sido una herramienta de gran importancia para el conocimiento del funcionamiento de los genes en distintos organismos, pero también tienen aplicaciones evidentes que se han ido utilizando no exentas de polémica. Estas técnicas son muy útiles, pero plantean algunas incógnitas, como que no permiten hacer una predicción del lugar preciso del genoma en el que se podrá realizar la modificación. Ello puede no ser muy importante en el caso de plantas o de animales modelo como el ratón, en los que se pueden producir varias modificaciones genéticas y escoger aquellas que no perturben ninguna función del genoma o que funcionen correctamente. Desde luego, excluyen su uso en humanos en particular si se trata de una modificación que se puede transmitir a las generaciones posteriores; por esta razón el uso de estas modificaciones está excluido en las convenciones internacionales sobre bioética. Si se trata de modificar células en cultivo que eventualmente se pueden transferir a un paciente con

propósitos curativos, es decir, la terapia génica, la situación es obviamente distinta.

Las aplicaciones de la modificación genética se han producido sobre todo en plantas. Las primeras plantas con el genoma modificado se cultivaron de forma comercial en 1994 en Estados Unidos. Desde entonces se han plantado millones de hectáreas principalmente de grandes cultivos como maíz, soja, colza o algodón. Las modificaciones que se han utilizado de forma prioritaria son aquellas que permiten a la planta adquirir la resistencia frente a un insecto o tolerancia frente a herbicidas. Estas tecnologías se han aplicado siguiendo reglamentaciones muy estrictas y se han enfrentado a la oposición de algunas organizaciones, sobre todo en Europa, lo que ha creado un conflicto que enfrenta distintas concepciones de la agricultura o la producción de alimentos. Los científicos se encuentran en una posición difícil en estos enfrentamientos.

Desde principios del siglo XX fueron apareciendo nuevos métodos de actuación sobre los genomas que permiten su modificación de forma más dirigida, lo que evita algunos de los efectos no deseados que pueden producirse con estas técnicas. En términos generales se denomina a estas técnicas como edición genómica. La más utilizada es la basada en un sistema de defensa de las bacterias frente a la invasión de virus, conocida como CRISPR/Cas9, que permite romper la cadena de ADN de un genoma en un punto preciso o dirigir una modificación genética a un lugar prefijado del genoma. El uso de la edición genómica en animales, plantas y humanos es objeto de un debate de naturaleza regulatoria y ética en todo el mundo; en el caso de los humanos tiene lugar entre aquellas posiciones que proponen utilizar estas tecnologías para modificar el genoma de los humanos de forma que puedan defenderse mejor de enfermedades o que puedan adquirir nuevas funciones. Esta posición ha desembocado en el transhumanismo, que defiende la transformación de la especie humana en otra con propiedades mejoradas que permitan afrontar mejor los retos de los tiempos futuros. Frente a esta concepción, existen posiciones que advierten de que los

efectos de la mayoría de las modificaciones genéticas, sobre todo en humanos, son difíciles de predecir y que una vez modificado el genoma de un individuo sus efectos son irreversibles si se transmite a su descendencia.

Las nuevas tecnologías digitales

El desarrollo de las aplicaciones de la biología ha sido el campo de debate más activo sobre los condicionantes éticos a los que se enfrenta la ciencia moderna. Aun así, existen una multitud de tecnologías no biológicas que afectan la vida de los ciudadanos y que son el objeto de debates activos, como por ejemplo las tecnologías de la comunicación, de la robótica o de la inteligencia artificial. Su impacto sobre las vidas de las personas es muy grande y es posible que vaya en aumento.

En el caso de las tecnologías de la comunicación, muchos debates se centran alrededor de sus efectos sobre la privacidad de las personas. Los teléfonos móviles están dotados de sistemas de geolocalización y de seguimiento que se utilizan para encontrar servicios de proximidad o para la orientación. Las aplicaciones correspondientes almacenan datos sobre los movimientos de los individuos, que si se cruzan con las búsquedas que se hacen a través de la red o los mensajes que se emiten o reciben por las redes sociales, las empresas que los gestionan tienen un retrato íntimo de los intereses y las actividades de los individuos. Es probable que en el estado actual de la expansión de estas tecnologías la privacidad completa sea ya una utopía, pero el uso que se haga de estos datos puede llegar a afectar en gran medida la vida de las personas y es objeto de debate y de propuestas de regulación.

La identificación de los individuos puede hacerse mediante códigos numéricos o de otro tipo, pero crecientemente se realiza también mediante mediciones biométricas tales como la huella dactilar o la identificación facial. Es posible actualmente identificar y seguir individuos en medio de una multitud. También se propone el uso de implantes electrónicos en el

cuerpo humano y en perspectivas futuras se proponen sistemas de comunicación directa entre ordenadores y el cuerpo humano que faciliten la búsqueda de datos y el tratamiento de algunas enfermedades, pero pueden representar una forma de alterar la integridad del cuerpo. A otro nivel, el uso de robots se está generalizando en muchas industrias, lo que puede evitar que haya personas que realicen trabajos penosos, aunque sus efectos sobre el trabajo humano son objeto de debate, a esto podemos añadir que ciertas aplicaciones de la inteligencia artificial que son importantes para la salud o para actividades esenciales de nuestra sociedad producen la percepción de dejar fuera de control aspectos de importancia social o médica. Se trata de cuestiones que implican profundos cambios sociales y que requieren una discusión sobre su marco de aplicación.

El contenido ético de estos debates está bien claro y también debería serlo que los científicos que participa en ellas estén al corriente de las reflexiones que se realizan por parte de las ciencias sociales. La filosofía lleva siglos trabajando para clarificar los conceptos de la ética desde perspectivas muy distintas. A la hora de debatir sobre las condiciones de aplicación de las nuevas tecnologías es enriquecedor introducir sus reflexiones en las discusiones que se producen. Por esta razón se han creado ámbitos de reflexión conjunta cuyos debates enriquecen el trabajo de la ciencia y deben iluminar la forma como se transmiten y aplican.

GRUPO EUROPEO DE ÉTICA DE LAS CIENCIAS Y LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS (GEE)

Una de las iniciativas que se han producido en el entorno de la Unión Europea ha sido la constitución de un órgano de reflexión sobre las consecuencias de las aplicaciones de las nuevas tecnologías sobre la sociedad europea desde una perspectiva de la ética. Se creó en 1991 como "Grupo de asesores de la Comisión Europea sobre las implicaciones éticas de las nuevas biotecnologías" para convertirse posteriormente en un grupo multidisciplinario, el Grupo Europeo de Ética de las Ciencias y las

Nuevas Tecnologías (GEE), que desde aquel momento ha formulado 30 opiniones sobre los aspectos éticos de las aplicaciones de distintas disciplinas. El grupo está formado por un máximo de 15 miembros con calificaciones en campos de la ciencia, la filosofía o el derecho de diferentes países europeos a quienes la Comisión Europea les requiere opiniones sobre los aspectos éticos de las aplicaciones de nuevas tecnologías que pueden incidir en el desarrollo de la legislación europea o en su aplicación. El grupo puede también proponer una temática de debate y este se hace con independencia entre sus miembros, los cuales pueden convocar expertos sobre el tema de discusión y la realización de mesas redondas en las que diferentes agentes sociales pueden expresar sus puntos de vista. El resultado final es una opinión fundamentada que puede que puede contener recomendaciones a la Comisión Europea.

El GEE tiene una función consultora en la que la contribución de científicos es esencial para disponer del conocimiento más preciso y actual sobre la cuestión que se debate. Que se escuchen los puntos de vista de diferentes actores es también fundamental sobre todo en un contexto como el europeo con fuertes y distintas tradiciones culturales que inciden en la forma en la que se desarrolla la tecnología y como se interpreta la ciencia. También se debe tener en cuenta que los aspectos éticos son competencia de cada país miembro de la Unión Europea, por lo que llegar a opiniones consensuadas puede ser un ejercicio complejo de respeto entre posiciones diversas. Si el GEE en su principio estuvo centrado en las biotecnologías, sus opiniones han ido ampliando sus objetivos hacia cuestiones de nuevas tecnologías como las telecomunicaciones o su influencia en el trabajo de los ciudadanos europeos.

El entorno global

La investigación científica no puede dejar de tener en cuenta la dimensión global de muchas de las cuestiones que preocupan a la sociedad, que tienen como mínimo dos tipos de aspectos. En primer lugar, la evolución del impacto que nuestra sociedad está teniendo sobre el entorno es un objeto de estudio por parte de grupos de investigación que parten de perspectivas

distintas y las conclusiones son preocupantes. Las observaciones sobre la atmósfera demuestran que la actividad industrial, agrícola o los transportes generan gases que afectan la radiación de calor del planeta y por tanto la temperatura planetaria aumenta creando alteraciones importantes en el clima. Por otra parte la actividad social necesita recursos que a veces son limitados y genera residuos de todo tipo que afectan el entorno de muchas regiones y de los océanos. La sociedad actual está tomando conciencia de que una reflexión ética sobre sus niveles de actividad le lleva a concluir que es un deber tomar decisiones para proteger a las generaciones futuras de escenarios irreversibles. La ciencia tiene el deber de analizar la situación, determinar las causas y generar escenarios de futuro.

En segundo lugar, el mundo actual no se entiende sin una reflexión global de las necesidades humanas a nivel planetario. Comercio e industria se han desarrollado de forma global y productos esenciales como los alimentos están llegando a los mercados de cualquier parte del mundo. La aviación transporta a millones de individuos a cualquier lugar en menos de un día, a menudo con el único objetivo de hacer una corta visita turística. Conflictos y falta de acceso a necesidades básicas impulsan a millones de personas a emigrar de sus pueblos y ciudades. La ciencia no puede ignorar las desigualdades que existen a nivel global. En este sentido, Naciones Unidas ha señalado un número de objetivos, los Objetivos del Desarrollo Sostenible, aprobados en el año 2015, que considera que deben conseguirse para que existan unos mínimos de justicia global. La ciencia no puede ignorar las necesidades globales que están incluidas en estas declaraciones y es una parte de la reflexión ética de los profesionales de la ciencia que estos objetivos se consideren cuando se realiza o se prioriza algún tipo de investigación.

Una ciencia libre y responsable

La historia nos muestra que la búsqueda de explicaciones para los fenómenos que observamos en la naturaleza puede dar

lugar a teorías o conceptos que tengan un impacto sobre la manera de pensar de los individuos, lo que puede dar lugar a conflictos de conciencia en los individuos porque les obligue a revisar sus concepciones del mundo. Estos conflictos se pueden generar frente a formas establecidas de pensar en las que pueden estar basadas estructuras sociales o sistemas de poder y sobre formas de producción que afecten el trabajo de muchas personas. Así ha ocurrido en el pasado y situaciones parecidas siguen ocurriendo en la actualidad. Una de las reacciones de los poderes políticos es tratar de controlar o dirigir la investigación científica en función de sus intereses. Por ello reivindicar la libertad de investigación y la libertad académica de expresión de las ideas científicas, junto a las filosóficas o de otro tipo en el entorno académico, es una tarea plenamente vigente. La ciencia se desarrolla en un entorno de libertad y democracia. Y la democracia necesita de una ciencia independiente para su desarrollo.

Al mismo tiempo hemos experimentado de forma continuada que la expresión de ciertas ideas nuevas y, sobre todo, la generalización de las nuevas aplicaciones tecnológicas puede desembocar en reacciones sociales intensas y contrarias a las nuevas tecnologías, pero también a la ciencia en su conjunto. En respuesta a esta situación se han realizado propuestas sobre la posibilidad de anticiparse a estas reacciones en lo que se denomina la Innovación e Investigación Responsables (RRI). Según estas propuestas se podría realizar un análisis previo a la investigación tratando de evitar resultados o aplicaciones que pudieran ser conflictivas[37]. También se estimulan acciones de interacción de los profesionales de la ciencia con ciudadanos tanto para explicar el contenido de la investigación que se realiza, sus razones y sus posibles consecuencias, como para que la comunidad científica sea consciente de las inquietudes y maneras de pensar de los ciudadanos de los que en definitiva depende la ciencia en sí misma.

37. Para ello se han desarrollado herramientas que pueden ser útiles a la hora de tomar decisiones estratégicas en la investigación (https://www.rri-tools.eu/).

Es dudoso saber si es posible anticiparse a las reacciones sociales frente a nuevas ideas o aplicaciones, aunque la experiencia en los últimos tiempos indica que no puede hacerse la ciencia ignorando las concepciones sociales existentes en cada momento. En consecuencia, la libertad en la práctica de la investigación científica debe ir asociada a su responsabilidad frente a la sociedad, lo cual implica esfuerzos de reflexión y explicación, aunque puede llegar a significar en algunos casos entrar en conflicto con grupos que defienden sus intereses particulares.

CONCLUSIÓN

Una ambición sin fronteras en un marco riguroso

La curiosidad humana no tiene fronteras ni tampoco la ambición por comprender el mundo que nos rodea y tratar de que en él vivamos de la mejor forma posible. Como ejemplo, una disciplina tan antigua en el pensamiento humano como la cosmología sigue aportando ideas y conceptos sobre la estructura y la dinámica del universo. Baste recordar el reciente descubrimiento de las ondas gravitatorias predichas por la teoría general de la relatividad y que han abierto una nueva puerta a observar fenómenos como la dinámica de los agujeros negros. La astronomía nos está proporcionando información sobre los planetas que orbitan estrellas semejantes a nuestro Sol. Esta información, y la que se está obteniendo sobre Marte, quizá nos va a permitir responder preguntas sobre la existencia de vida fuera de nuestro planeta. En el mundo opuesto de lo infinitamente pequeño, la física sigue tratando de encontrar una teoría única que explique la formación y la dinámica de la materia. Estas son investigaciones que probablemente no van a tener aplicaciones prácticas, pero son las que nos permiten tratar de responder a preguntas sobre el universo y sobre la vida que nos han preocupado desde el nacimiento mismo de la filosofía natural.

La biología sigue, a inicios del siglo XXI, en su periodo más fructífero analizando de forma cada más precisa los

mecanismos íntimos del funcionamiento de los seres vivos. El desarrollo exponencial de la genómica está permitiendo entender la base molecular de la enorme variedad que observamos entre los seres vivos y que ha fascinado a los naturalistas desde siempre. Esta comprensión incluye la especie humana y por tanto nos da explicaciones sobre el origen de nuestra especie y sobre nuestra diversidad como individuos. Las neurociencias por su parte profundizan en el funcionamiento del cerebro, acercándonos a entender las características que hacen a la especie humana tan única entre las especies animales. En el otro extremo de lo más grande estamos pudiendo examinar la dinámica de los sistemas geológicos y su interacción con las poblaciones vivas mediante sistemas de observación cada vez más detallados y descubrimos que nuestra actividad está alterando algunos equilibrios planetarios, y para todo ello desarrollamos modelos matemáticos que nos permiten proponer ideas sobre la complejidad de los sistemas y sobre cómo podríamos actuar sobre ellos.

Algo parecido podemos decir del estudio de los materiales de todo tipo cuya estructura nos descifran la química y las nanociencias y otras disciplinas de la ciencia. Por tanto, la dinámica de la ciencia sigue tratando de responder a esta curiosidad intrínseca de los humanos. Ello se traduce ahora como siempre en la necesidad de una ciencia independiente que pueda continuar rompiendo ideas establecidas a partir de un conocimiento contrastable y de validez universal que es el distintivo propio a la ciencia. La defensa de la libertad académica es en el momento de escribir esta obra tan importante como lo ha sido a lo largo de los siglos que nos han precedido.

Al mismo tiempo, muchos de los descubrimientos científicos los alcanzamos porque, entre muchos otros temas, investigamos en cuestiones que interesan para nuestra vida material, para nuestra alimentación o para entender la evolución de nuestro propio cuerpo y del entorno y la manera en que todos ellos interaccionan. Sin disponer de acceso a fuentes de energía nuestro mundo complejo no podría funcionar y ahora mucho menos cuando debemos estar permanentemente

conectados mediante las tecnologías digitales. La tecnología es la base de la economía en nuestro mundo, en el que la innovación es aquello que hace que una empresa sea competitiva. En este entorno cambiante es difícil para los individuos desarrollar su vida sin comprender cuestiones de importancia médica o tecnológica que influyen cada vez más en su vida. Y con más razón lo mismo podemos decir de aquellos que toman decisiones de impacto social. La interrogación a la ciencia por parte de la sociedad y de los propios individuos es por tanto continua, aunque a menudo esta se mantenga como una actividad marginal, pero a la que hay que acudir cuando las circunstancias lo demandan. Por tanto, la ambición de responder a la demanda social por el conocimiento permanece viva en todo momento.

Para responder a esta ambición la ciencia no puede hacerse fuera de unos límites estrictos que imponen la sociedad y la ciencia misma. Hay ciertas preguntas que nos formulamos que no van a poder responderse siguiendo las reglas estrictas de la ciencia. El experimento sobre el origen de la vida y su evolución no va a poder realizarse ya que requeriría de pruebas que duran miles de millones de años. Podemos hacer hipótesis cada vez más completas sobre ello, pero el experimento mismo es imposible. Algunos sí son factibles, pero pueden ser muy difíciles y costosos. La ciencia experimental requiere el empleo de recursos para los que a veces la sociedad no encuentra justificación. Los grandes instrumentos de la física son en este momento colaboraciones globales por su gran costo y algunos no llegan a realizarse. Hay por tanto límites metodológicos o económicos en la ciencia y en estas condiciones se definen unas prioridades para la investigación científicas que dependen de intereses económicos, de demandas sociales o de valores culturales. Los profesionales de la ciencia pueden lamentarlo, y a menudo expresan sus puntos de vista de forma pública, pero la decisión depende obviamente de políticas científicas que son competencia de las instancias públicas.

Hay también limitaciones que impone la sociedad, como en los experimentos que se hacen con humanos o con

animales, y que han sido ampliamente comentadas a lo largo del libro. Algunos deben realizarse necesariamente con medidas de seguridad a veces complejas y en algunas sociedades no se permiten llevar a cabo algunas investigaciones porque consideran que son contrarias a sus valores culturales, políticos o religiosos. Y desde luego la ciencia ella misma se impone unos límites en su manera de actuar fuera de los cuales la actividad científica no tiene sentido.

Sin el seguimiento de unas buenas prácticas, el trabajo de los científicos no puede ser aceptable para ellos mismos y para la sociedad en general, por lo que es importante para el científico integrar en su trabajo las bases metodológicas y éticas en que se sustenta. Escuchar los mensajes que provienen tanto de la filosofía como de la historia debería ser un requerimiento constante en el curso de su carrera profesional, lo que no significa poner barreras a la ambición por profundizar en nuestro conocimiento de los universos que nos rodean y nos forman y por resolver cuestiones que la sociedad demanda.

Hemos llegado a un estadio en la aventura de la ciencia en el que más que nunca es exigible rigor, honestidad, transparencia y rendimiento de cuentas como características de la ciencia que se ha convertido en una de las actividades que fundamentan las sociedades de este siglo XXI.

Lecturas recomendadas*

Artola, Miguel y Sánchez Ron, José Manuel (2017): *Ciencia: lo que hay que saber*, Espasa, Madrid, 488 pp.

Bunge, Mario (2013): *La ciencia. Su método y su filosofía*, Laetoli, Pamplona, 140 pp.

Camps, Victòria (2005): La *voluntad de vivir. Las preguntas de la Bioética*, Ariel, Barcelona, 224 pp.

Díez, José Antonio y Moulines, Carlos Ulises (2008): *Fundamentos de Filosofía de la Ciencia*, Ariel, Barcelona, 536 pp.

Gribbin, John (2000): *Introducción a la ciencia*, Crítica, Barcelona, 240 pp.

Kuhn, Thomas (2006): *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, Madrid, 361 pp.

Mosterín, Jesús (2016): *Conceptos y teorías en la Ciencia*, Alianza, Madrid, 376 pp.

Popper, Karl (2008): *La lógica de la investigación científica*, Tecnos, Madrid, 456 pp.

Puigdomènech, Pere (2016): *Desafíos del futuro*, Crítica, Barcelona, 254 pp.

Ramón y Cajal, Santiago (2017): *Reglas y consejos sobre investigación científica. Los tónicos de la voluntad*, CSIC, 206 pp.

Russell, Bertrand (2010): *Historia de la Filosofía Occidental*, Espasa, Madrid, 512 pp.

Wilson, Edward O. (2014): *Cartas a un joven científico*, Debate, Barcelona, 256 pp.

* Las ediciones son las últimas encontradas.

SITIOS WEB DE INTERÉS

Academia China de Ciencias: http://english.cas.cn/
Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos: https://www.nationalacademies.org
Agencia Estatal de Meteorología (AEMET): http://www.aemet.es
Asociación de Academias Europeas (ALLEA): https://allea.org
Bóveda del fin del mundo: https://www.seedvault.no/
Centre National pour la Recherche Scientifique (CNRS): http://www.cnrs.fr/
Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN): https://home.cern/
Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI): https://www.ncbi.nlm.nih.gov
Ciencia en el Parlamento: https://cienciaenelparlamento.org
Comisión de Mujeres y Ciencia del CSIC: https://www.csic.es/es/el-csic/ciencia-en-igualdad/mujeres-y-ciencia
Comité Consultivo Nacional de Ética para las Ciencias de la Vida y la Salud (CCNE): https://www.ccne-ethique.fr/fr/pages/presentation-du-comite-consultatif-national-dethique-pour-les-sciences-de-la-vie-et-de-la
Comité de Bioética de Cataluña: https://canalsalut.gencat.cat/ca/sistema-de-salut/el-sistema-de-salut-de-catalunya/ambits-dactuacio/comite-de-bioetica-de-catalunya/
Comité de Bioética de España: http://www.comitedebioetica.es/
Comité para la Ética en las Publicaciones (COPE): https://publicationethics.org
Consejo de Ética de Alemania: https://www.ethikrat.org/en/
Consejo Europeo de Academias de Ciencias (EASAC): https://easac.eu
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC): https://www.csic.es/
Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR): https://www.cnr.it/en
Convención para la Diversidad Biológica (CBD): https://www.cbd.int/
Declaración DORA: https://sfdora.org/read/
European Network of Research Integrity Offices (ENRIO): http://www.enrio.eu/
Estación de investigación agrícola de Rothamsted: https://www.rothamsted.ac.uk/
Food and Drug Organization (FDA): https://www.fda.gov
Foro para las Infraestructuras Científicas (ESFRI): https://www.esfri.eu/
Google Scholar: https://scholar.google.com
Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR): https://www.cgiar.org/
Grupo Europeo de Ética de las Ciencias y las Nuevas Tecnologías (GEE): https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/strategy/support-policy-making/scientific-support-eu-policies/ege_en (en inglés)
Instituto Europeo de Bioinformática (EMBL-EBI): https://www.ebi.ac.uk

Laboratorio Europeo de Biología Molecular: https://www.embl.de/
Nuffield Council on Bioethics: https://www.nuffieldbioethics.org/
Objetivos del Desarrollo Sostenible: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/
Observatorio Europeo del Sur: https://www.eso.org/public/
Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA): https://www.noaa.gov
Proyecto ITER: https://www.iter.org/
Publons: https://publons.com/about/home
Pubmed: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov
Review Commons: https://www.reviewcommons.org
Science Europe: https://www.scienceeurope.org/about-us/
Science Media Center de la Gran Bretaña: https://www.sciencemediacentre.org
Scopus: https://www.scopus.com/standard/marketing.uri
Servicio de Información de Noticias Científicas (SINC): https://www.agenciasinc.es
Shanghai Ranking Consultancy: http://www.shanghairanking.com/aboutarwu.html
Sociedad Max Planck: https://www.mpg.de/en
Telescopio Hubble: https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/main/index.html
The Office of Research Integrity (ORI): https://ori.hhs.gov/
Times Higher Education: https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings
Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights (TRADES): https://www.upov.int/portal/index.html.es
Unión para la Protección de Obtenciones Vegetales (UPOV): https://www.upov.int/portal/index.html.es
Web of Science: https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science

¿QUÉ SABEMOS DE?

Por qué y cómo se hace la ciencia

La ciencia es una actividad compleja y muy diversa que involucra a millones de personas y que tiene impacto en la manera en que pensamos, en que toman decisiones los gobiernos y en que vivimos. Este texto trata de responder por qué la sociedad dedica esfuerzos en investigación científica, cómo se investiga, quién lo hace y dónde se hace. Intenta describir la evolución de la ciencia en la historia, las funciones múltiples que cumple en nuestras sociedades y cuál es su funcionamiento interno. La ciencia actual es un mundo complejo, con normas estrictas que son las que le dan credibilidad ante la sociedad, pero está sufriendo una gran transformación por efecto de su misma influencia en la propia sociedad actual a causa de la globalización y de la digitalización de sus actividades. Todo ello no deja de plantear conflictos y de desvelar debilidades, inherentes a toda obra humana. A lo largo del libro se presentarán temáticas que son objeto de debates entre especialistas.

Pere Puigdomènech es licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Barcelona y doctor en Ciencias Biológicas por la Autónoma de Barcelona. Ha trabajado en el Instituto de Biología Molecular de Barcelona, del que fue director hasta 2002. Ha sido también director del Centro de Investigación en Agrigenómica (CSIC-IRTA-UAB-UB). Sus trabajos de investigación recientes han estado relacionados con la regulación de los genes y la genómica de las plantas cultivadas.

ISBN: 978-84-00-10777-2

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN · CSIC · EDITORIAL CSIC